

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра двигунів  
внутрішнього згоряння,  
установок та технічної  
експлуатації

«Допущений до захисту»  
В.о. завідувача кафедри  
Олексій ГОГОРЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА ГОЛОВНОГО СУДНОВОГО ДВИГУНА

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Освітня програма – Двигуни внутрішнього згоряння

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти

Аркадій ПРОСКУРІН

Андрій ОГОРОДНИК

Миколаїв 2024

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

|                     |                                                                     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Інститут, факультет | Машинобудівний навчально-науковий                                   |
| Кафедра             | Двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації |
| Ступінь             | Магістр                                                             |
| Спеціальність       | 142 Енергетичне машинобудування                                     |
|                     | (шифр і назва)                                                      |
| Освітня програма    | Двигуни внутрішнього згоряння                                       |

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри ДВЗ, У та ТЕ  
Олексій ГОГОРЕНКО

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

# ЗАВДАННЯ

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

*Огородник Андрій Васильович*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модернізація системи управління подачею палива головного суднового двигуна

2. Керівник роботи к.т.н., доц. Проскурін А. Ю.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “        ”        20        року №       

### 3. Строк подання здобувачем роботи

4. Вихідні дані до роботи Двигун – DEUTZ 645 L6, паливо – дизельне, потужність  
двигуна – 3200 кВт, частота обертання колінчастого валу – 600 хв<sup>-1</sup>

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

*Застосування двигуна DEUTZ 645 L6 на багатоцільовому судні «DEO VOLENTE»;  
Визначення напрямків вдосконалення паливної системи; Модернізація системи  
управління подачею палива; Забезпечення вимог охорони праці; Економічне  
обґрунтування впровадження модернізації*

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
*Машинне відділення багатоцільового судна «DEO VOLENTE»; Поперечний переріз  
 двигуна DEUTZ 645 L6; Паливна система; Система управління подачею палива;  
 Кінематичні схеми швидкодіючих механічних приводів*

## 7. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів роботи  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|----------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Оформлення 1 розділу |                               |          |
| 2     | Оформлення 2 розділу |                               |          |
| 3     | Оформлення 3 розділу |                               |          |
| 4     | Оформлення 4 розділу |                               |          |
| 5     | Оформлення 5 розділу |                               |          |
| 6     | Оформлення креслень  |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |
|       |                      |                               |          |

Здобувач освіти

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
 (підпис)

\_\_\_\_\_  
 (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
 (підпис)

\_\_\_\_\_  
 (прізвище та ініціали)

*Андрій ОГОРОДНИК*

(прізвище та ініціали)

*Аркадій ПРОСКУРІН*

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній розроблений комплекс заходів щодо покращення роботи паливної системи двигуна DEUTZ 645 L6 шляхом модернізації системи управління подачею палива. Розглянуто економічний ефект від модернізації. Наведені заходи щодо забезпечення охорони праці.

Кваліфікаційна робота виконана українською мовою на 68 сторінках розрахунково-пояснювальної записки. Використано 10 джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

*Ключові слова:* паливна система, насос, економічність, клапан.

The qualification work presents a set of measures to improve the operation of the fuel system of the DEUTZ 645 L6 engine by modernizing the fuel supply control system. The economic effect of the modernization is analyzed. Measures to ensure occupational safety are also provided.

The qualification work is executed in Ukrainian language on 68 pages of explanatory note. 10 sources are used. The graphic part is presented on 5 drawings of format A1.

*Key words:* fuel system, pump, efficiency, valve.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 2     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## ЗМІСТ

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Вступ.....</b>                                                                              | <b>4</b>  |
| <b>Розділ 1. Застосування двигуна DEUTZ 645 L6 на багатоцільовому судні «DEO VOLENTE».....</b> | <b>5</b>  |
| <b>Розділ 2. Визначення напрямків вдосконалення паливної системи.....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>Розділ 3. Модернізація системи управління подачею палива.....</b>                           | <b>30</b> |
| <b>Розділ 4. Економічне обґрунтування впровадження модернізації.....</b>                       | <b>49</b> |
| <b>Розділ 5. Забезпечення вимог охорони праці.....</b>                                         | <b>55</b> |
| <b>Висновки.....</b>                                                                           | <b>62</b> |
| <b>Список використаної літератури.....</b>                                                     | <b>63</b> |
| <b>Додаток А. Машинне відділення багатоцільового судна «DEO VOLENTE»..</b>                     | <b>64</b> |
| <b>Додаток Б. Поперечний переріз двигуна DEUTZ 645 L6.....</b>                                 | <b>65</b> |
| <b>Додаток В. Паливна система.....</b>                                                         | <b>66</b> |
| <b>Додаток Г. Система управління подачею палива.....</b>                                       | <b>67</b> |
| <b>Додаток Д. Кінематичні схеми швидкодіючих механічних приводів.....</b>                      | <b>68</b> |

## ВСТУП

Техніко-економічні характеристики дизеля значною мірою залежать від ефективності роботи паливної системи. Забезпечення надійності паливної апаратури та стабільності параметрів паливоподачі протягом тривалого терміну експлуатації є ключовими вимогами до судових дизелів.

Основними критеріями досконалості паливоподачі виступають показники економічності, потужності, шумності роботи, динамічності, надійності пуску, а також рівень викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах. Важливе значення мають коефіцієнт пристосовності системи, дотримання обмежень щодо тиску в циліндрах, жорсткості згоряння, теплових навантажень і температури газів перед турбіною.

Мета даної роботи – розробити умови по підвищенню паливної економічності головного двигуна багатоцільового судна шляхом вдосконалення системи управління подачею палива.

Задачі що вирішуються у роботі:

1. Проведення комплексного аналізу паливних систем, які встановлені в сучасних середньообертових двигунах та визначення основних тенденцій розвитку.
2. Розробка системи паливоподачі.
3. Оцінити запропоновані рішення, технічні рекомендації та заходи з техніки безпеки.

**Об'єкт дослідження** – система подачі палива.

**Предмет дослідження** – параметри системи подачі палива.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 4     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

# РОЗДІЛ 1

## ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА DEUTZ 645 L6 НА БАГАТОЦІЛЬОВОМУ СУДНІ «DEO VOLENTE»

CONOSHIP International була створена близько 50 років тому для координації проектної та маркетингової діяльності великої групи суднобудівних компаній, переважно каботажних суден, які тоді базувалися в північній частині Голландії. З майже 20 суднобудівних верфей, що брали участь у той час, зараз залишилося лише три (плюс чотири закордонні «асоційовані компанії»), що спричинило зміну напрямку діяльності CONOSHIP, яка перетворилася на консалтингову організацію, що виконує проекти концептуального дизайну спільно з власником, а потім підбирає відповідного будівельника по всьому світу.

Таким чином було укладено контракт з DEO VOLENTE, а будівництво корпусу було доручено OAG, дочірній компанії Conoship в Щецині, Польща. Проектуванням судна займалася нідерландська компанія Vuyk Engineering Groningen BV, там же було завершено оснащення та введення судна в експлуатацію.

Цікавим твердженням щодо проекту DEO VOLENTE (рис. 1.1 – 1.2, табл. 1.1) [1] є те, що він став «найшвидшим вантажним судном водотоннажністю менше 3000 тон у світі», з експлуатаційною швидкістю 18 вузлів, отриманою завдяки установці обладнання, виконаній Wolfards & Wessels Werktuigbouw, і зосередженою на двигуні DEUTZ 645 L6 потужністю 3200 кВт при 600 об/хв, гребний гвинт діаметром 4000 мм і редуктор SV 75-P48. Електричні потреби забезпечуються генератором змінного струму потужністю 1600 кВт з валовим приводом, що працює при 1500 об/хв, і двома дизельними установками Scania потужністю 455 кВт при 1500 об/хв. Також постачається носовий рушій HRP потужністю 300 кВт з лопатями FP.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 5     |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |





Рисунок 1.1 –Багатоцільове судно DEO VOLENTE

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           | 6     |



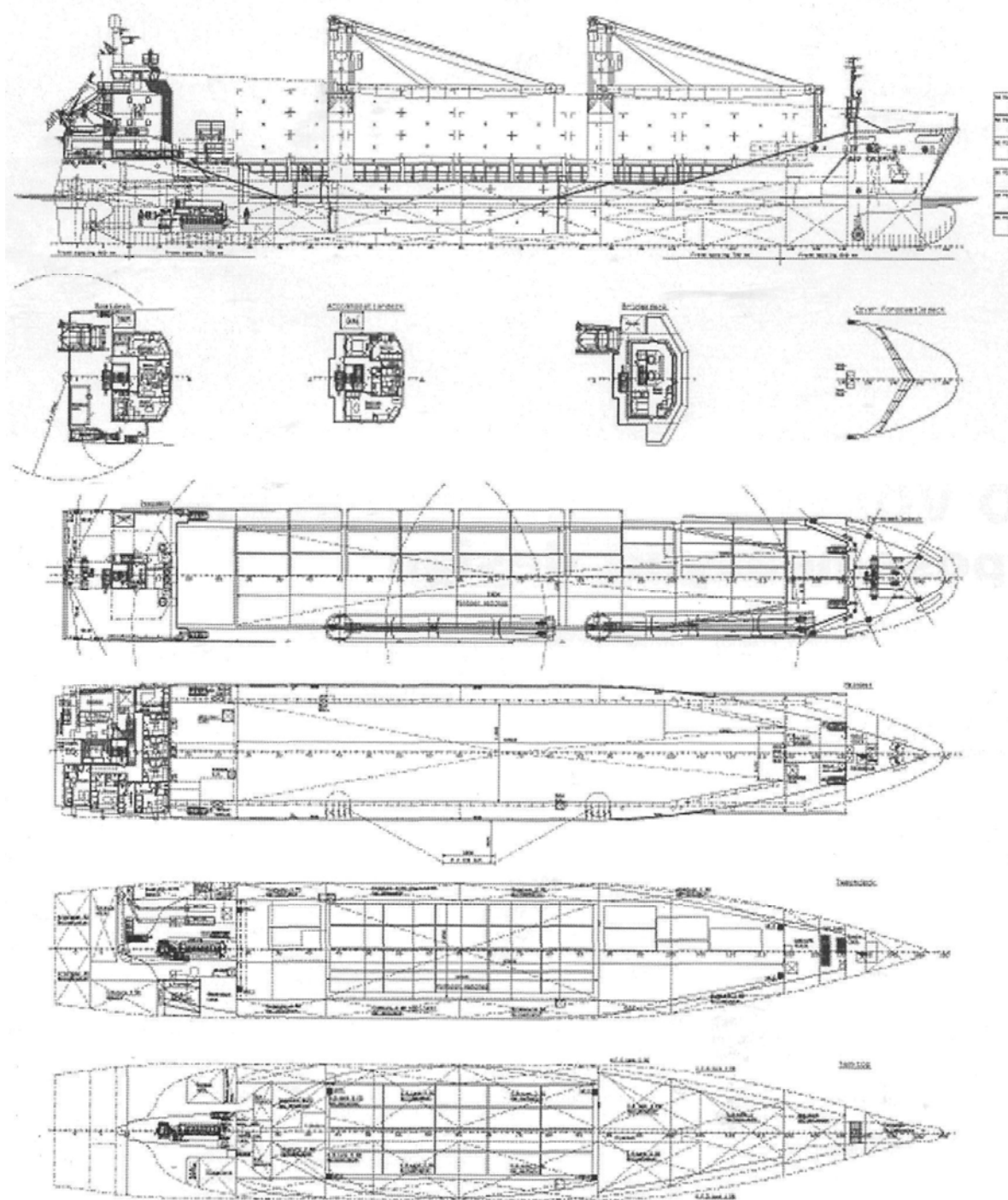


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд багатоцільового судна DEO VOLENTE

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

KPM.142.6222м.24.12.00.ПЗ

Аркуш

7

Тонка форма корпусу, необхідна для досягнення таких високих характеристик, обмежила простір в нижній частині носової частини єдиного вантажного трюму з подвійною обшивкою глибиною 61,60 м x 11,50 м x 8,17 м, і ця зона була відведена під глибокі танки для водяного баласту. Тим не менш, трюм повністю придатний для контейнерів, генеральних і навалювальних вантажів, проектних вантажів і небезпечних вантажів.

На верхній палубі є форштевень, трюм закривається понтонними люками, придатними для перевезення важких вантажів, і розташований на високому, по всій довжині, багажнику, що дозволяє перевозити кабельні барабани великого діаметру повністю закритими в трюмі. Знімні твіндекові кришки понтонів можуть розділити простір на верхній і нижній відсіки, які також можуть служити в якості зернових відсіків.

Навантаження на верхню частину танка становить 15 т/м<sup>2</sup>, а вантаж обробляється за допомогою двох великих гідравлічних палубних кранів Liebherr CBV 120(81)/16(24), вбудованих в конструкцію по правому борту і здатних разом піднімати 240 т вантажу. Автоматизоване управління можливе за допомогою власної системи Litronic компанії Liebherr. Для підйому вантажу понад 130 тон доступні резервуари для стабілізації проти крену.

Судно ходить під прапором Нідерландів. Позивний судна – PHFJ. MMSI – 246518000. IMO – 9391658.

Таблиця 1.1 – Головні характеристики судна

| Параметр                        | Значення |
|---------------------------------|----------|
| Довжина максимальна, м          | 104,80   |
| Довжина між перпендикулярами, м | 98,20    |
| Ширина найбільша, м             | 15,60    |
| Проектна осадка, м              | 7,40     |
| Дедвейт, т                      | 3500     |
| Швидкість судна, вуз            | 18,00    |

## Опис двигуна DEUTZ 645 L6

Права та ліва сторона двигуна DEUTZ 645 L6 [2], що розглядається у кваліфікаційній роботі показано на рис. 1.3 та рис. 1.4, розріз двигуна на рис. 1.5.

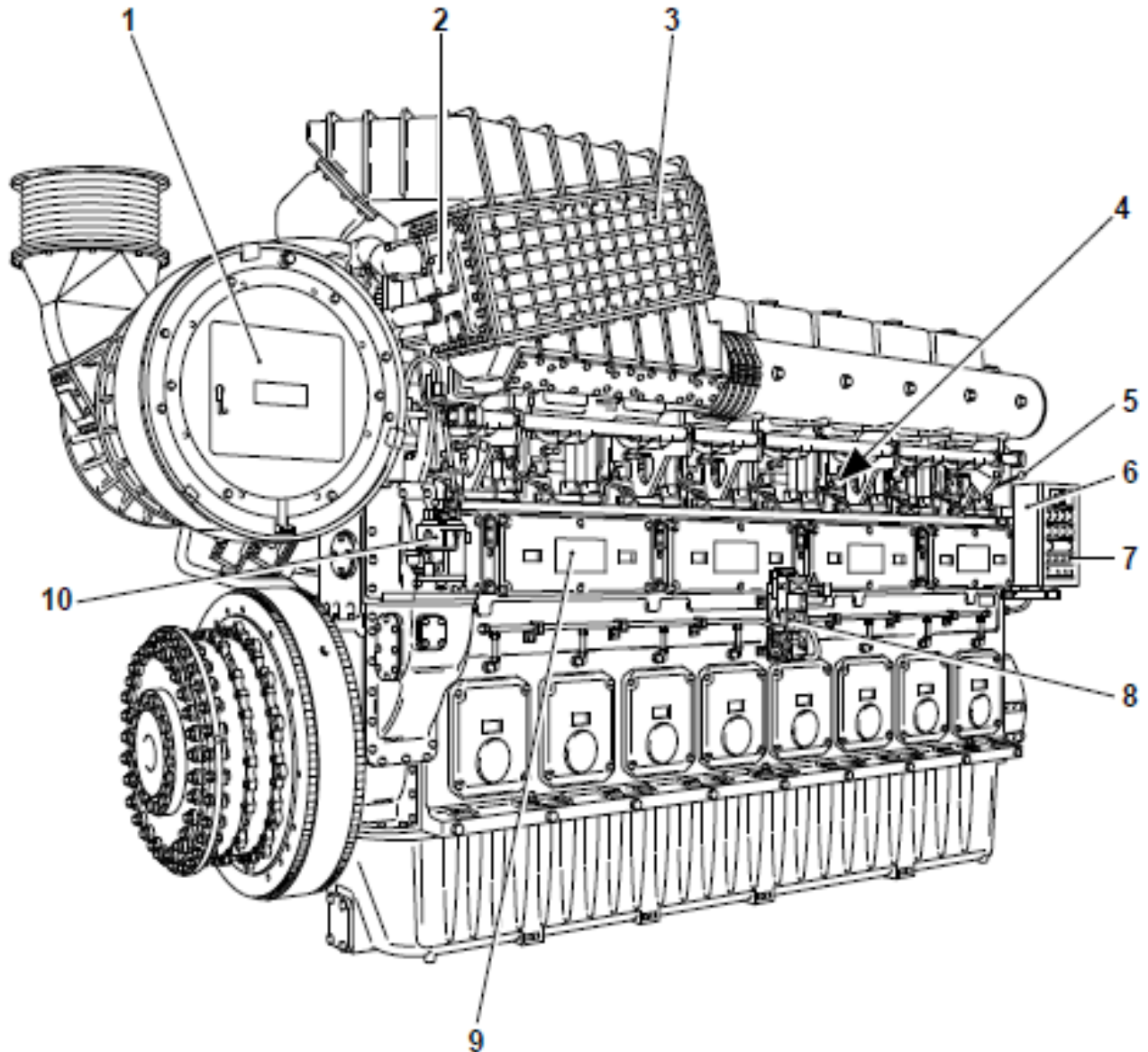


Рисунок 1.3 – Права сторона двигуна DEUTZ 645 L6 (восьмициліндрове виконання):

- 1 – турбокомпресор; 2 – підключення охолоджуючої рідини; 3 – ОНП;  
4 – паливний насос; 5 – важіль завершення; 6 – панель управління;  
7 – пускова кнопка; 8 – монітор відділення для заводних рукояток;  
9 – кришка відсіку розподільного валу; 10 – привід

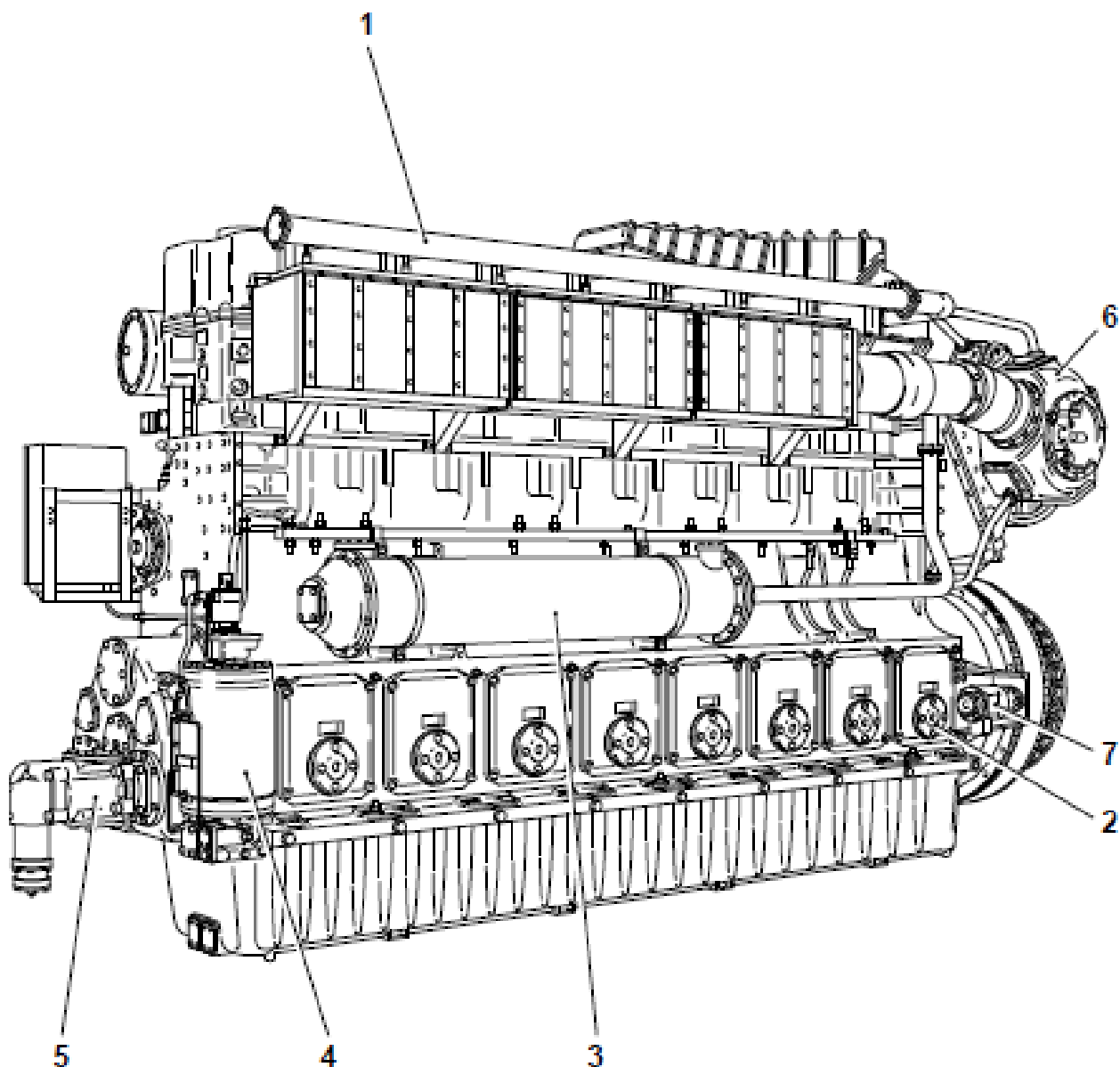


Рисунок 1.4 – Ліва сторона двигуна DEUTZ 645 L6

(восьмициліндрове виконання):

- 1 – труба збору охолоджуючої рідини; 2 – кришка огляду запобіжного клапану; 3 – маслоохолоджувач; 4 – зворотній фільтр з вбудованим регулюючим клапаном тиску масла; 5 – масляний насос; 6 – турбокомпресор; 7 – повітряний стартер;

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 10    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

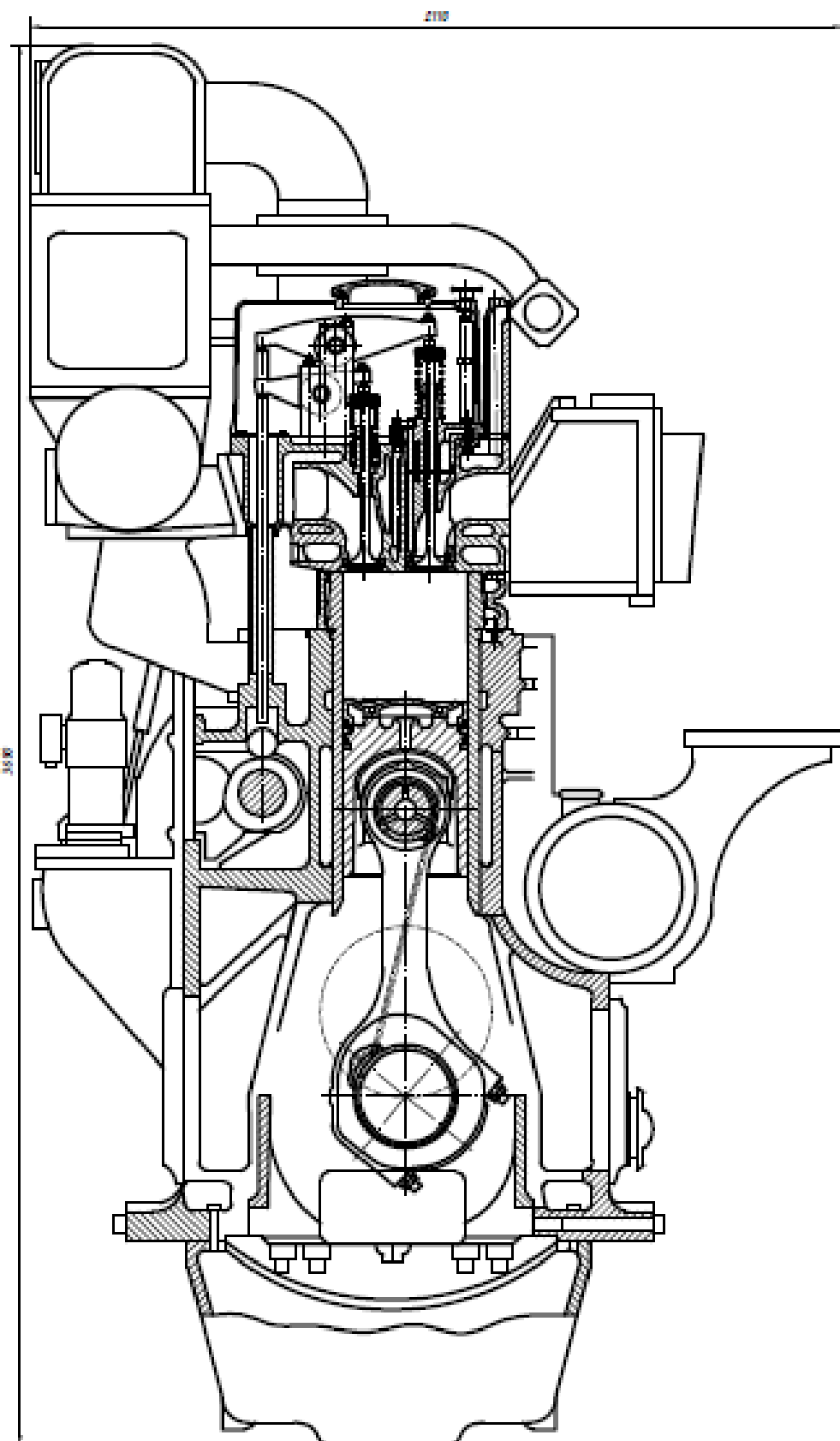


Рисунок 1.5 – Поперечний перетин двигуна DEUTZ 645 L6

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ

Аркуш

11

*Картер и масляный поддон (рис. 1.6). Картер зазнає впливу сил, що виникають у циліндрі та приводному механізмі. Газова сила, яка діє в циліндрі, передається через поршень на шатун і далі на колінчастий вал.*

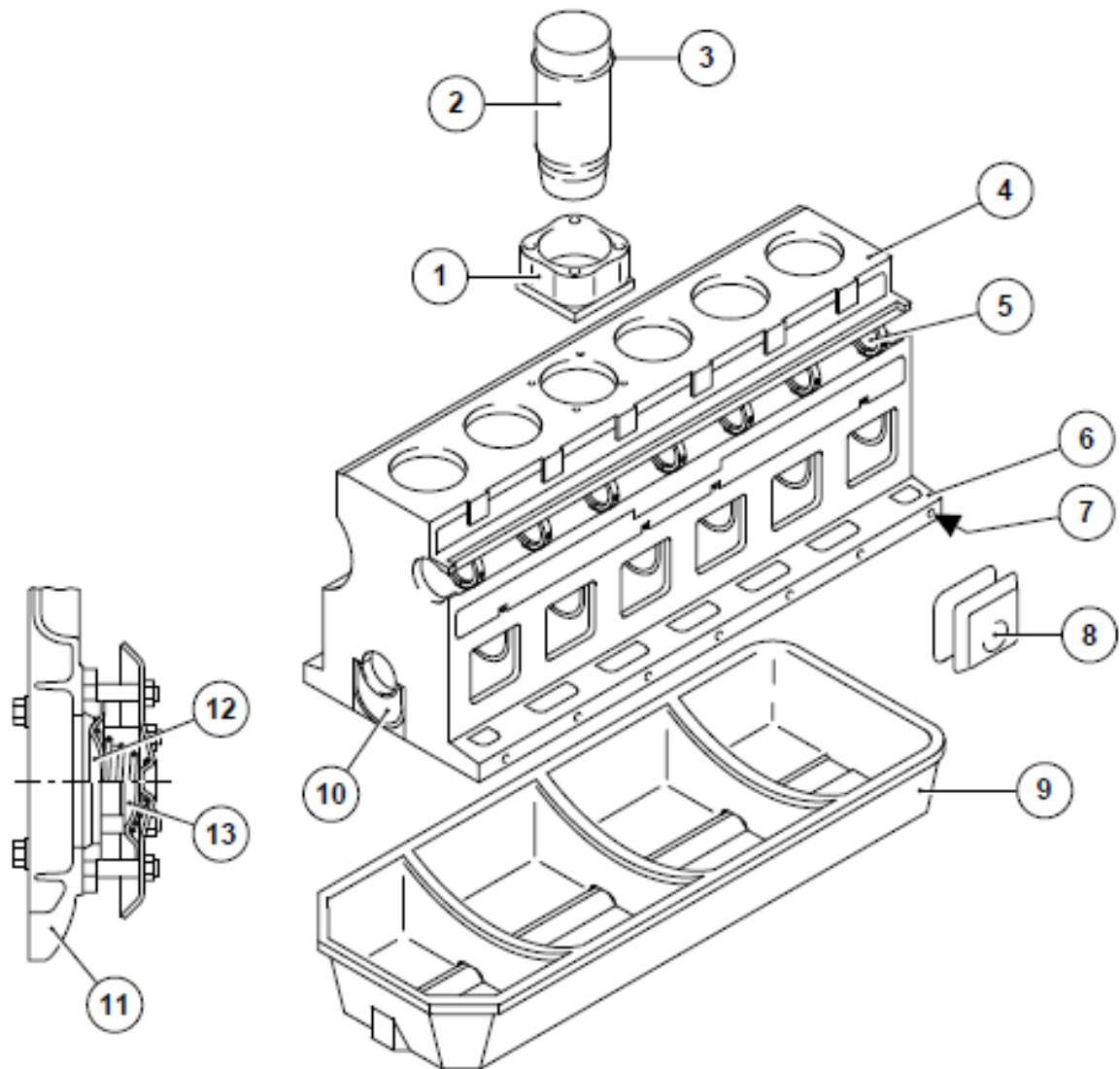


Рисунок 1.6 – Картер і масляний піддон двигуна:

1 – рубашка циліндра; 2 – гільзи циліндра; 3 – кільце; 4 – картер;  
 5 – підшипник контрольного валу; 6 – смуги зв'язку; 7 – гвинти для крос-  
 натягу; 8 – отвір кришки огляду; 9 – масляний піддон; 10 – основна кришка  
 підшипника; 11 – кришка для огляду отвору із запобіжним клапаном;  
 12 – запобіжний клапан закритий; 13 – запобіжний клапан відкритий

Протидіюча сила, що виникає між головкою блоку циліндрів і кришкою основного підшипника, передається на картер. Цілісність картера забезпечується вбудованою циліндричною оболонкою для кожного циліндра.

Зовні крутний момент, що впливає на вихідну потужність, передається на фундамент через привід. На картері передбачені вбудовані механізми та контактні смуги. Висока жорсткість картера досягається завдяки поперечному натягу в зоні основних підшипників.

Втулки гільз циліндрів розташовані низько, що дозволяє охолоджувальній рідині протікати безпосередньо навколо них і забезпечує інтенсивне охолодження камери згоряння. Проточне мастило подається в картер двигуна, а потім збирається в окремі резервуари для подальшого використання.

*Головки циліндрів* (рис. 1.7) закріплені на картері за допомогою восьми шпильок. Кожна головка оснащена двома впускними та двома випускними клапанами.

Також передбачено з'єднання для вимірювання тиску в циліндрі (індексації). Впускні та випускні клапани, обладнані пристроями для обертання, приводяться в дію за допомогою штовхачів, розташованих на головках циліндрів.

*Випускні клапани* встановлені в спеціальних корпусах, що дозволяє їх демонтувати без зняття головки блоку циліндрів. Впускні клапани ізолювані від відсіку охолоджувальною втулкою, вбудованою в головку циліндра. Індикаторний клапан розташований зовні головки блоку циліндрів.

Між гільзою циліндра та головкою блоку циліндрів встановлена прокладка, яка забезпечує герметичність камери згоряння та запобігає потраплянню охолоджуючої рідини.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 13    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |



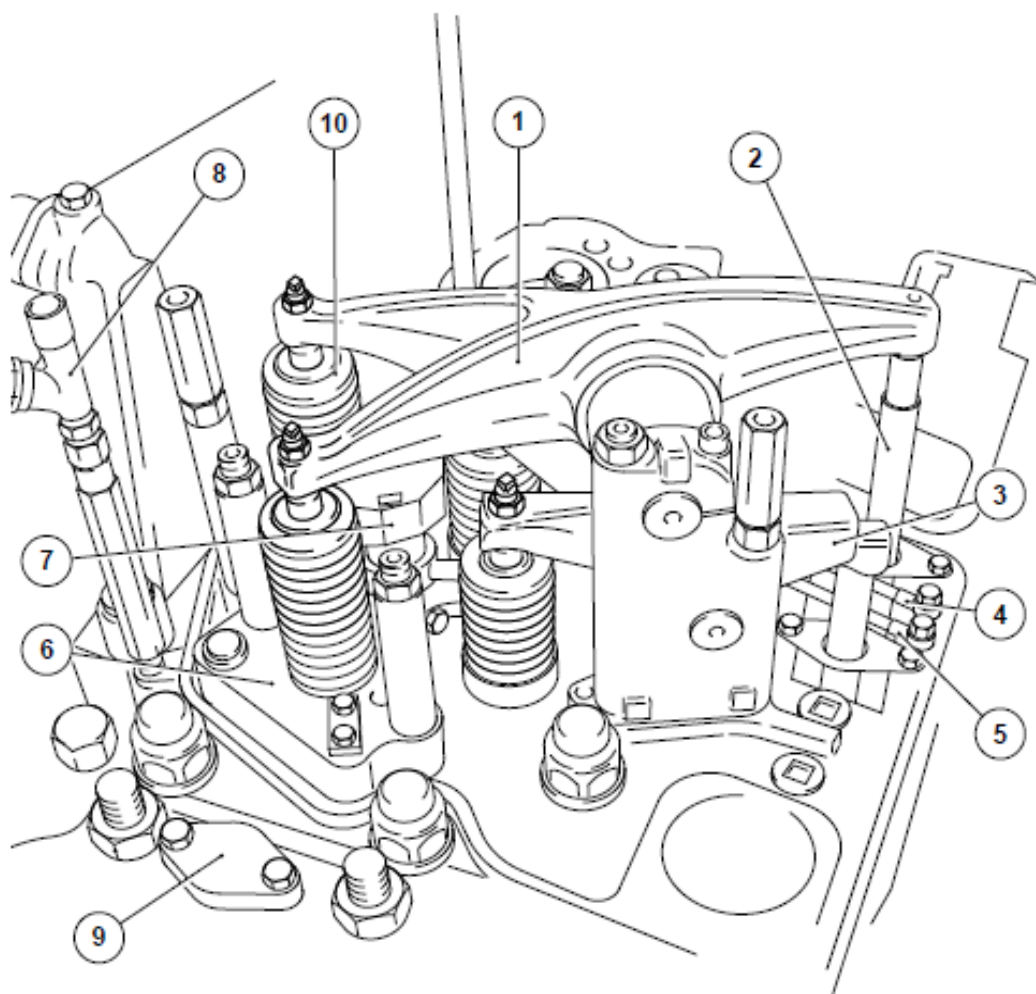


Рисунок 1.7 – Головка блоку циліндрів двигуна:

1 – підйомник випускного клапану; 2 – стопорний важіль; 3 – підйомник впускного клапану; 4 – маслопровід подачі охолодженого масла; 5 – витік маслопроводу; 6 – корпус випускного клапану; 7 – інжектор; 8 – клапан індексації; 9 – вставка; 10 – пристрій повороту клапана

КШМ включає шатун із поршнем (рис. 1.8), колінчастий вал (рис. 1.9) і маховик.

*Шатуни* розташовані під певним кутом, а для демонтажу шатуна і поршня їх необхідно виймати через гільзу циліндра. Кутовий канал у колінчастому валу дозволяє мастилу надходити до підшипників поршневого пальця та в охолоджувальний відсік поршня.

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ

Аркуш

14

Поршень виготовлений із двох частин: верхня частина виконана з кованої сталі, а нижня – з кованого алюмінію.

Комплект поршневих кілець складається з трьох компресійних кілець, розташованих у верхній частині поршня в спеціальних канавках, і одного маслоснімного кільця, яке знаходиться в нижній частині.

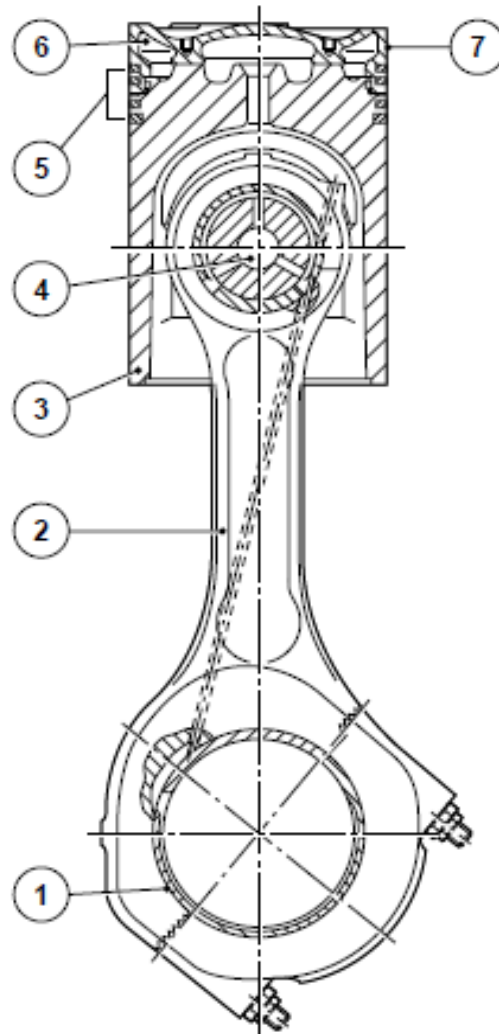


Рисунок 1.8 – Поршень і шатун:

1 – шатунні вкладиші; 2 – шатун; 3 – нижня частина поршня; 4 – поршневий палець; 5 – поршневі кільця; 6 – відсіки охолодження; 7 – верхня частина поршня

*Колінчастий вал* закріплений у картері на підшипниках. Противаги, розташовані на валу, зменшують навантаження на корінні підшипники, компенсуючи сили інерції та моменти, які вони створюють.

*Маховик* виконує кілька важливих функцій: сприяє проходженню поршнів через мертві точки, забезпечує рівномірніше обертання колінчастого вала в багатоциліндровому двигуні на холостому ходу та полегшує запуск двигуна. Маховик виготовляють із чавуну, після чого його динамічно балансують разом із колінчастим валом.

Фланець маховика центрується у визначеному положенні за допомогою штифтів або болтів, які забезпечують його жорстке кріплення. Колінчастий вал приводиться в рух під дією газових сил, що передаються через поршні та шатуни.

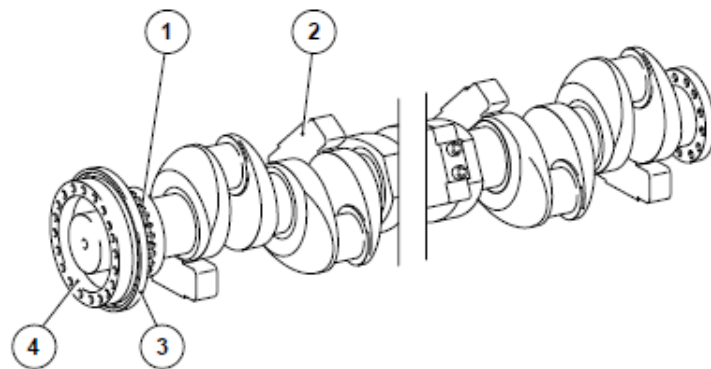


Рисунок 1.9 – Колінчастий вал:

1 – колінчастий вал; 2 – противаги; 3 – масляне кільце; 4 – фланець маховика

*Система* змащення зображена на рис. 1.10. Мастило зменшує тертя між поверхнями ковзання, відводить тепло від зон контакту, верхньої частини поршня та форсунки. Мастильна плівка на поверхні циліндра забезпечує герметизацію поршневих кілець. Крім того, мастило утримує забруднення та частки суспензії, транспортуючи їх до масляного фільтра.

Мастильна рідина проходить через охолоджувач мастила, потім через постійно промивний фільтр у системі змащення двигуна. Термостат

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 16    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

контролює обсяг мастила, що проходить через охолоджувач, залежно від його температури.

Тиск мастила в системі регулюється за допомогою запобіжного клапана, встановленого на шестерні масляного насоса. Клапан відкривається, якщо тиск мастила перевищує допустимий рівень, щоб захистити насос від пошкоджень.

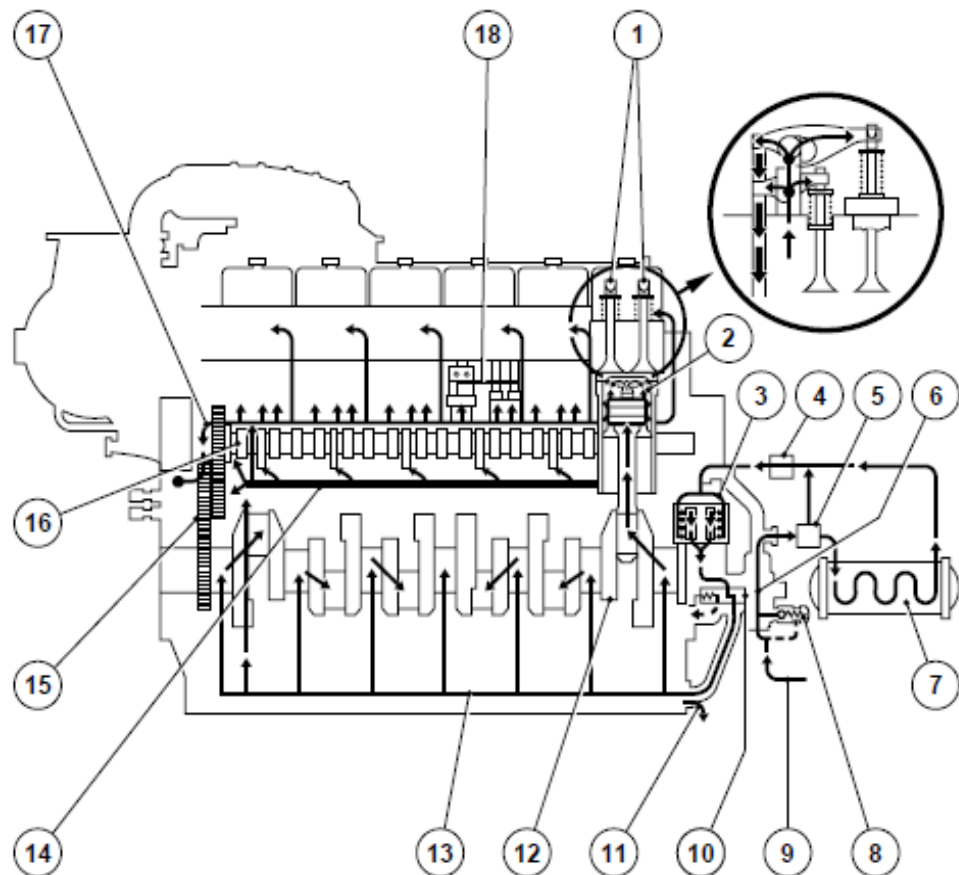


Рисунок 1.10 – Система змащення:

1 – підйомний клапан; 2 – поршень; 3 – зворотній фільтр (з боку двигуна);  
 4 – автоматичний фільтр (з боку системи); 5 – термостат масла; 6 – масляний насос; 7 – охолодження мастила; 8 – запобіжний клапан; 9 – резервуар мастила; 10 – клапан тиску; 11 – повернення в резервуар мастила;  
 12 – колінчастий вал; 13 – масляний піддон; 14 – лінія для управління мастилом вала; 15 – проміжна шестерня; 16 – управління вал; 17 – лінія для штовхача мастила; 18 – штовхач

Турбокомпресор (рис. 1.11) двигуна.

Принцип роботи заснований на використанні енергії вихлопних газів. Потік відпрацьованих газів спрямовується на крильчатку турбіни, яка закріплена на валу. Обертання турбіни передається на лопаті компресора, розташовані на тому ж валу, які нагнітають повітря в циліндри двигуна.

Завдяки наддуву повітря подається до циліндрів під тиском, а не лише за рахунок розрідження, створюваного рухом поршня. Це дозволяє збільшити об'єм повітря, що надходить у двигун, а отже, і суміші повітря з паливом. У результаті під час згоряння утворюється більший обсяг газів, які займають більший простір, що створює сильніший тиск на поршень і підвищує потужність двигуна.

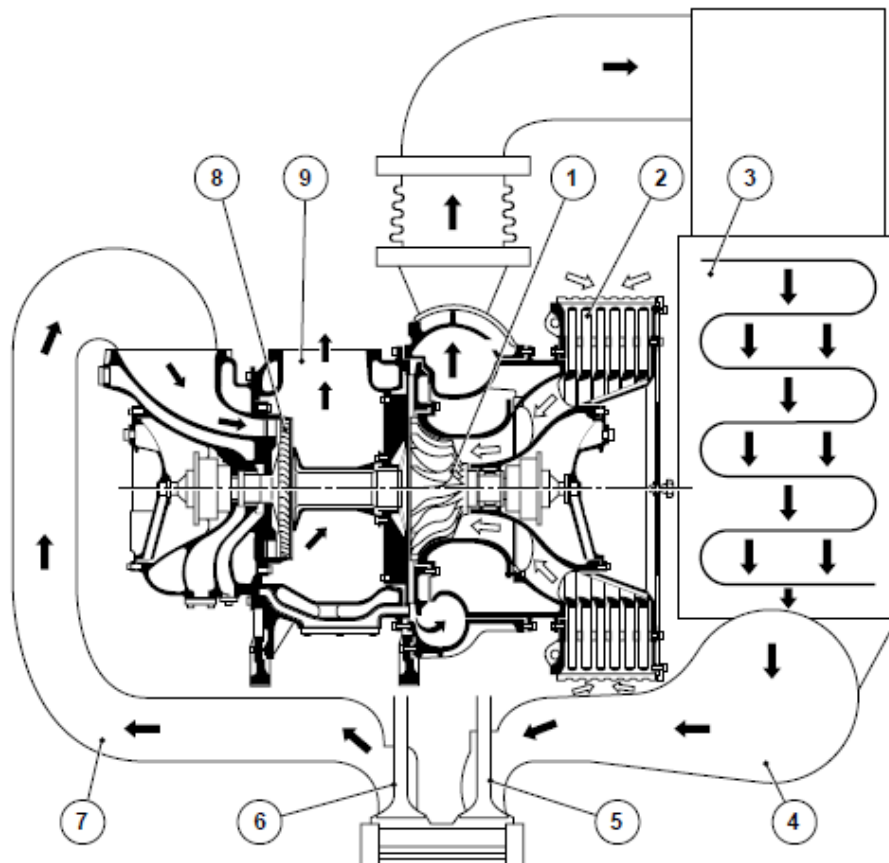


Рисунок 1.11 – Турбокомпресор:

1 – компресор; 2 – впускний повітряний фільтр; 3 – ОНП; 4 – впускний трубопровід; 5 – впускний клапан; 6 – випускний клапан; 7 – випускний трубопровід; 8 – газова турбіна; 9 – глушник

|     |      |             |        |      |
|-----|------|-------------|--------|------|
|     |      |             |        |      |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |

КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ

Аркуш

18

## РОЗДІЛ 2

### ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Значення паливної апаратури (ПА) для дизельного двигуна визначається не лише неможливістю його нормальної роботи у разі несправності ПА, але й її ключовим впливом на основні характеристики двигуна.

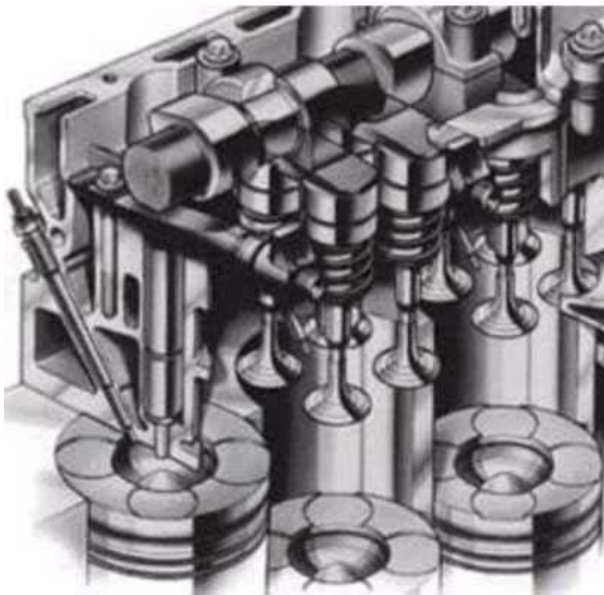
До критеріїв досконалості ПА, що визначають вплив на роботу дизеля, належать потужність і шумність роботи, витрата палива, рівень викидів у відпрацьованих газах, динамічні показники транспортного засобу, надійність запуску, коефіцієнт пристосовності, а також дотримання обмежень щодо тиску в циліндрі, жорсткості згоряння, теплових навантажень і температури газів перед турбіною [3].

Вирішення екологічних проблем дизельних двигунів безпосередньо пов'язане з удосконаленням ПА. Більшість складних і затратних робіт у процесі створення та вдосконалення дизелів пов'язані саме з оптимізацією внутрішньоциліндрових процесів і узгодженням їх із конструктивними та режимними параметрами ПА.

На сьогодні вважається, що для забезпечення якісного сумішоутворення форсунка має бути розташована вертикально і співвісно камері згоряння в поршні. Такий підхід дозволяє досягти ідентичності паливних струменів. Однак це ускладнює конструкцію головки циліндра та обслуговування форсунки (рис. 2.1, а).

Установка форсунки під нахилом може призвести до нерозрахованого розташування паливних струменів, порушення оптимального процесу сумішоутворення та згоряння (рис. 2.1, б). Це залишається проблемою в старих моделях двигунів, таких як Д144.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 19    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |



*а*



*б*

Рисунок 2.1 – Вертикальне розташування форсунок в голівці з чотирма клапанами і одним розподільним валом в дизелі Opel Ecotec (а) і похиле в голівці з двома клапанами в дизелі JTD Alfa Romeo 156 (б).

З точки зору впливу на робочий процес слід враховувати, що його оптимізація проводилася виробниками протягом багатьох років, а в деяких випадках — десятиліть. Тому будь-яке відхилення від оптимальних умов його організації зазвичай призводить до погіршення характеристик [3].

Одним із ключових параметрів організації робочого процесу є забезпечення необхідного тиску впорскування. Підвищений тиск впорскування є унікальним фактором, що дозволяє досягати одночасно кількох, на перший погляд, суперечливих результатів: зменшення викидів NOx, зниження жорсткості згоряння та механічних навантажень на дизель, а також зниження витрати палива та скорочення викидів частинок, CO і CHx. Наприклад, зміна кута випередження впорскування палива (КВВП), який формує кожен з кривих на рис. 2.2, забезпечує лише одностороннє покращення екологічних показників.



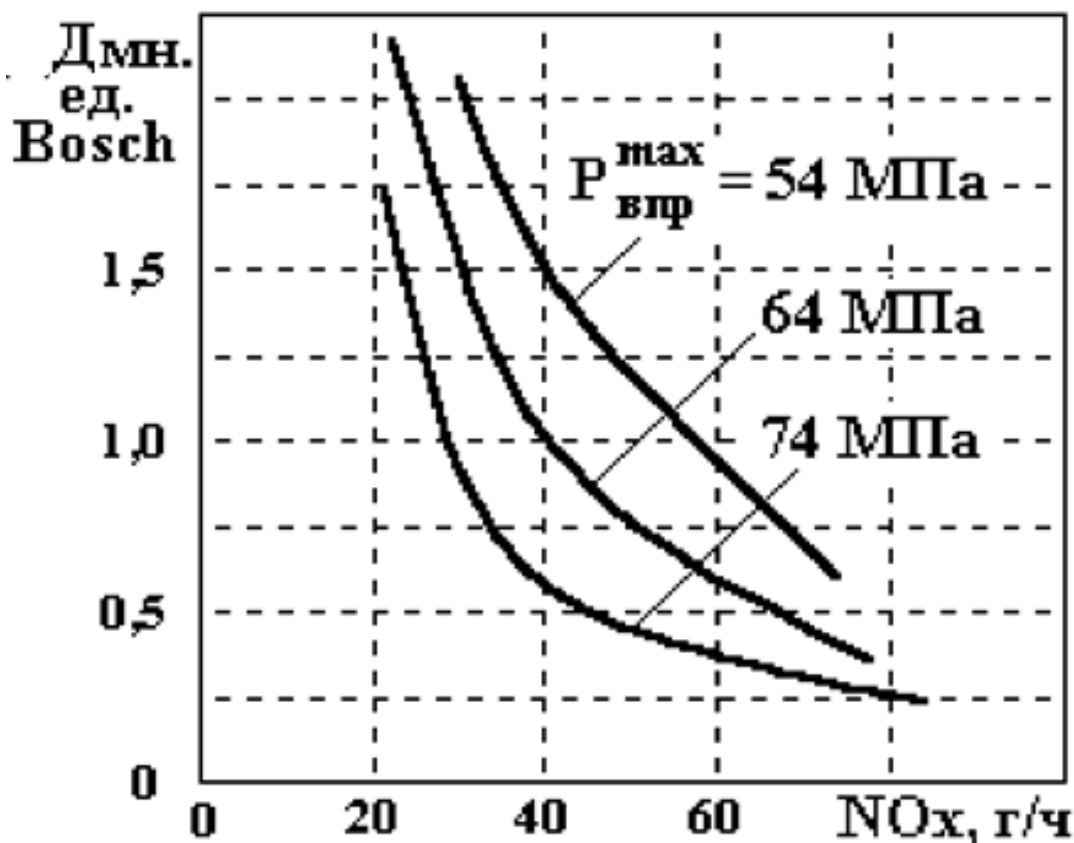


Рисунок 2.2 – Типова діаграма емісії шкідливих речовин при різних КВВП і тисках впорскування (дизель Mercedes OM611 при  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $p_e = 0,4 \text{ МПа}$ )

Не дивно, що за останні 15...20 років максимальний тиск впорскування зріс у 3...5 разів, досягнувши 250 МПа. З точки зору експлуатації та ремонту, першочергово слід уникати використання нестандартної комплектації паливної апаратури, особливо застарілих модифікацій, навіть якщо вони здаються взаємозамінними. Наприклад, паливний насос високого тиску (ПНВТ) із меншим діаметром або ходом плунжера, іншою висотою розвантажувального паска нагнітального клапана, різними сопловими отворами форсунки чи тиском початку впорскування призведе до змін у параметрах паливоподачі. Використання старих зразків зумовлює зниження тиску впорскування, що, у свою чергу, спричиняє підвищення димності відпрацьованих газів і витрати палива.

Крім того, слід враховувати підвищений ризик засмічення сопел сучасних дизелів через їх збільшену кількість та зменшення діаметра (до 0,08...0,1 мм).

Зниження тиску впорскування з часом експлуатації обумовлюється зменшенням тиску початку впорскування через втрату зусилля попереднього натягу пружини форсунки, а також зносом плунжерної пари, прецизійних поверхонь, запірного конуса і сопел розпилювача.

Сучасним напрямком удосконалення паливної апаратури (ПА) є перехід від механічного до електронного управління. Основні переваги електронної системи управління паливоподачею дизельних двигунів:

Гнучке регулювання циклової подачі палива залежно від частоти обертання двигуна, забезпечення необхідної зовнішньої швидкісної характеристики.

Мінімальна нерівномірність подачі палива між циліндрами або, за потреби, оптимальна нерівномірність подачі й кута випередження впорскування (КВВП) для кожного циліндра з урахуванням конструктивних особливостей, виготовлення та технічного стану.

Оптимізація регулювання КВВП залежно від режиму роботи двигуна та інших факторів.

Автоматизація процесів запуску двигуна, включаючи збагачення палива під час запуску, відключення подачі на примусовому холостому ходу, а також регулювання на перехідних режимах.

Відключення окремих циліндрів або циклів роботи для економії палива на часткових режимах.

Самодіагностика електронних компонентів і компенсація несправностей через резервні програми.

Управління режимами роботи двигуна, включаючи регулювання характеристик впорскування і тиску (як у системі Common Rail).

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 22    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Сучасні суворі екологічні вимоги до рівня викидів шкідливих речовин (ШР) дедалі складніше виконувати без використання можливостей електронного управління. Наприклад, при високих навантаженнях пріоритетом у регулюванні КВВП стає зниження викидів NOx, тоді як на низьких навантаженнях – скорочення витрати палива та зменшення димності.

Досягнення стандартів Євро-3 дизелями без електронного управління є складним завданням, а виконання вимог Євро-4 і вище — практично неможливе. Проте широке впровадження електронного управління стримується через дефіцит досвіду, високі витрати та обмеженість доступних методик діагностики й обслуговування.

Розширення застосування акумуляторних систем впорскування палива (Common Rail) можна розглядати як окремий напрямок або як подальший етап розвитку паливної апаратури з електронним управлінням. У порівнянні з традиційними системами прямої дії, ці системи забезпечують оптимальне регулювання тиску і характеристик впорскування, а також дозволяють реалізувати багатофазну подачу палива.

Особливістю таких систем є можливість гнучкого управління тиском впорскування на кожному робочому режимі, що дозволяє оптимізувати робочий процес двигуна на всіх режимах його роботи (рис. 2.3). З точки зору експлуатації основне завдання полягає в забезпеченні дотримання заданих алгоритмів управління тиском впорскування.

Те саме стосується управління характеристиками впорскування. У швидкохідному дизелі з типовою для розділеної паливної апаратури характеристикою впорскування, 75...80% подачі палива відбувалося під час затримки займання [4]. Така підвищена динамічність циклу спричиняє перевантаження кривошипно-шатунного механізму, збільшує рівень шуму, вібрацій і викидів NOx.

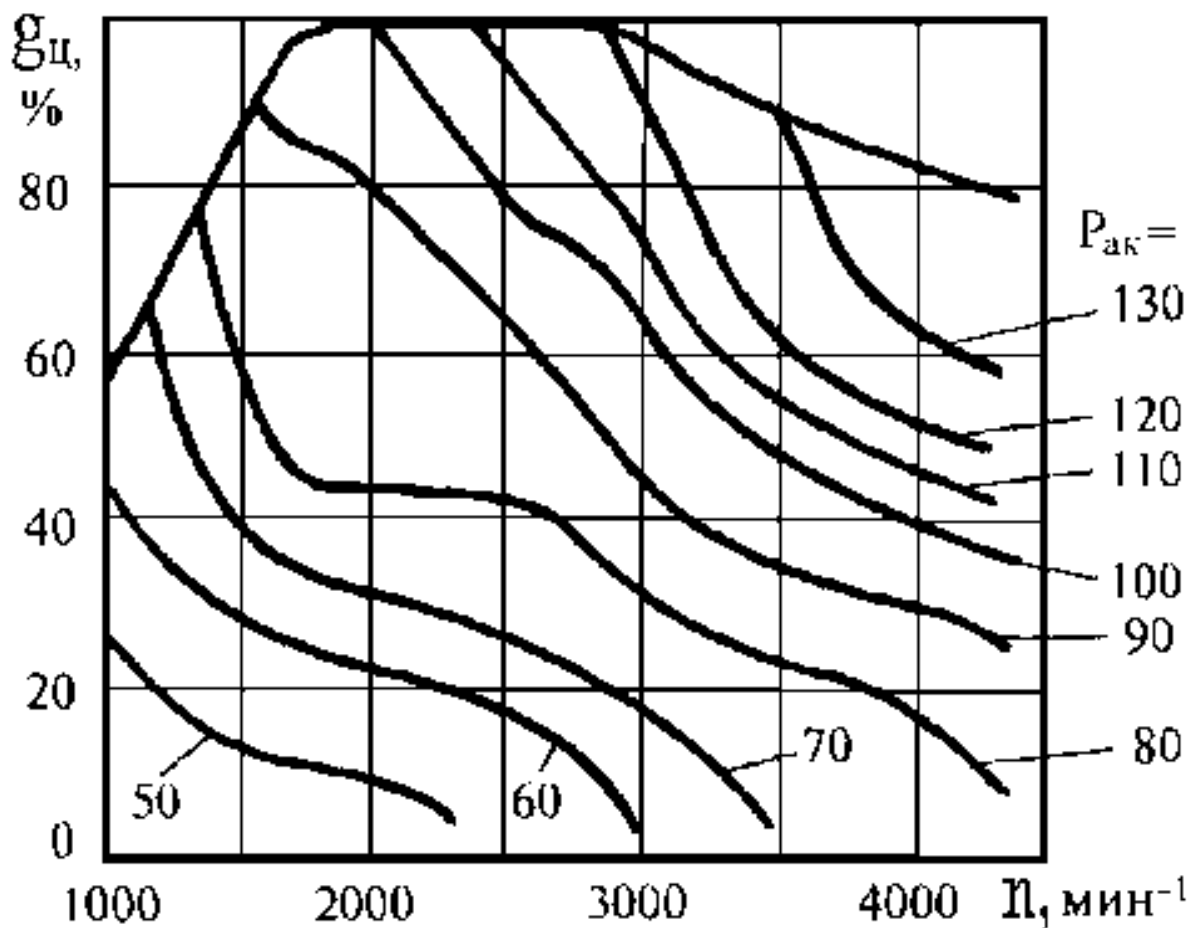


Рисунок 2.3 – Тиск в акумуляторі Common Rail в функції частоти обертання і відносної подачі для дизеля Mercedes OM611

Знизити динамічність циклу можна, формуючи пологий або ступінчастий передній фронт характеристики впорскування. У традиційній паливній апаратурі це завдання частково вирішують за допомогою двопружинної форсунки. Радикальним способом скорочення затримки займання при подачі основної порції палива є двофазна або багатфазна подача. Повною мірою ця концепція реалізується лише в системах Common Rail.

Ефективність двофазної подачі для зменшення викидів NOx і рівня шуму (рис. 2.4) стимулює подальший розвиток технологій її впровадження.

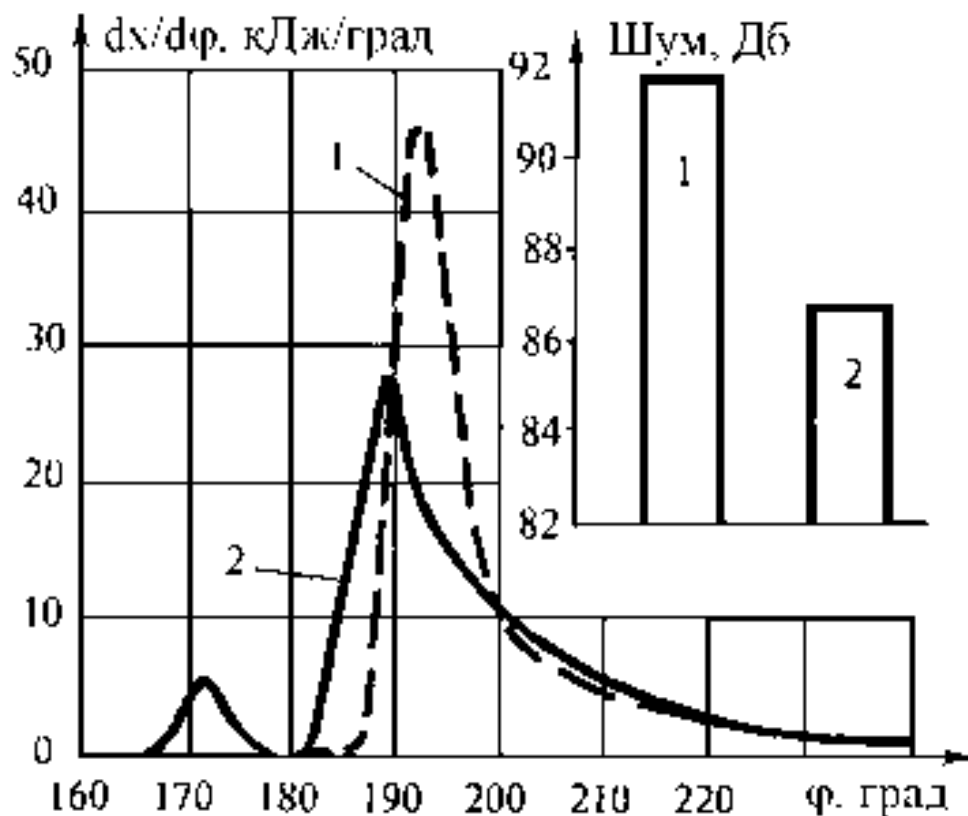


Рисунок 2.4 – Швидкість тепловиділення і гучність дизеля Mercedes OM611 при  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $p_c = 0,2 \text{ МПа}$  з однофазним (1) і двофазним (2) впорскуванням

Водночас подача малих порцій палива залишається технічно складним завданням. Це пов'язано з обмеженнями виконавчих органів, зокрема електрогідравлічних форсунок. При погіршенні технічного стану цих компонентів (наприклад, через зниження рухливості клапана чи голки) порушується процес сумішоутворення та згоряння [4].

Управління кутом випередження впорскування (КВВП) є обов'язковим для оптимізації робочого процесу дизеля, оскільки воно залежить щонайменше від 5...8 режимних параметрів двигуна, що реалізується лише за допомогою електронного управління. У той час розподільні ПНВТ з механічними регуляторами забезпечували управління КВВП лише за 1...3 параметрами. Деякі дизелі зовсім не мають системи регулювання КВВП, що не відповідає сучасним стандартам. У таких випадках характеристика

управління залежно від частоти обертання двигуна є протилежною оптимальній: при збільшенні частоти КВВП зменшується. Для автомобільних двигунів ці вимоги вважаються менш критичними через переважання одного основного режиму роботи.

Серед показників, які безпосередньо впливають на якість робочого процесу дизеля, важливе значення мають швидке завершення впорскування та відсутність підтікання розпилювача. Доведено, що підтікання призводить до підвищення емісії СНх у відпрацьованих газах, закоксовування розпилювача і порушення його роботи. Повільне завершення впорскування спричиняє утворення великих крапель, що підвищує димність відпрацьованих газів і збільшує витрату палива.

Навпаки, різке завершення подачі палива у ПНВТ при зниженій швидкодії голки форсунки може викликати зворотне закидання газів у розпилювач, що призводить до закоксовування його внутрішніх поверхонь. Ще однією проблемою є явище підвпорскування – мимовільне додаткове впорскування палива значно пізніше основного циклу. Його виникнення можливе через негерметичність розвантажувального паска нагнітального клапана або неправильне регулювання на надмірно високий тиск початку впорскування.

До паливної апаратури (ПА) висуваються також додаткові вимоги, які враховуються на етапі проєктування і мають забезпечуватися під час експлуатації:

- Максимальний ресурс роботи, що відповідає ресурсу двигуна (для високооборотних дизелів це 4–10 тис. годин).
- Мінімальна нерівномірність подачі палива між циліндрами або, за необхідності, керована нерівномірність подачі для кожного циліндра.
- Знижений рівень власного шуму (менше 80 дБ на відстані 1 м) та сприяння зменшенню шуму двигуна.
- Можливість видалення повітряних пробок шляхом прокачування

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 26    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

системи.

- Формування оптимальної швидкісної характеристики ПА.
- Забезпечення динамічних якостей двигуна на перехідних режимах роботи, включаючи прискорення перехідних процесів у самій ПА (регулювання залишкового тиску, створення ПА із залишковим тиском, незалежним від режимів роботи).
- Вібростійкість і герметичність, що запобігають втратам палива та проникненню пилу, води й повітря.
- Працездатність у широкому діапазоні температур повітря.

Цей перелік може бути доповнений як загальними вимогами до всієї системи ПА, так і специфічними для її окремих елементів.

Сучасні суднові дизельні двигуни (ДВЗ) використовують різноманітні системи паливopодачі, які забезпечують високу ефективність, надійність та відповідність суворим екологічним стандартам. Розглянемо ключові схеми та конструктивні особливості сучасних паливних систем.

#### *1. Традиційні системи з механічним управлінням*

Традиційні паливні системи, що використовуються в багатьох суднових ДВЗ, базуються на механічних паливних насосах високого тиску (ПНВТ) і форсунках. Основними елементами таких систем є:

Паливний насос високого тиску — забезпечує нагнітання палива до тиску, необхідного для впорскування у камеру згоряння.

Форсунки — розпилюють паливо, забезпечуючи його рівномірне змішування з повітрям.

Регулятори подачі палива — визначають кількість палива, що подається в залежності від навантаження.

Недоліками таких систем є обмежені можливості оптимізації впорскування на різних режимах роботи, що обмежує їхню ефективність і екологічність.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 27    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |



## *2. Акумуляторні системи (Common Rail)*

Акумуляторні системи Common Rail є передовим рішенням у паливоподачі сучасних дизелів. Основна особливість таких систем — окреме створення високого тиску і впорскування.

Тиск у системі підтримується постійно за допомогою насоса високого тиску та акумулятора палива (рейки).

Електронно-керовані форсунки дозволяють точно регулювати час, тривалість і кількість впорскування палива.

Багатофазне впорскування (попереднє, основне, завершальне) забезпечує зниження викидів, шуму та рівномірне згоряння.

Common Rail дозволяє досягти високих рівнів ефективності та екологічності, однак потребує складного обслуговування і високої якості палива.

## *3. Гібридні системи з електронним управлінням*

Сучасні системи паливоподачі часто поєднують елементи традиційних і акумуляторних систем. Наприклад, гібридні схеми включають механічні насоси з електронним управлінням форсунками. Це дозволяє:

Забезпечити високий тиск впорскування.

Гнучко регулювати подачу палива в залежності від режиму роботи двигуна.

Зменшити витрати палива та рівень викидів.

## *4. Паливні системи з насос-форсунками*

Системи насос-форсунок інтегрують функції насоса і форсунки в одному вузлі. Основні переваги:

Високий тиск впорскування (до 2200 бар), що покращує процес сумішоутворення.

Компактність конструкції.

Простота обслуговування порівняно з Common Rail.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 28    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Недоліками є обмеження у регулюванні тиску та складність забезпечення рівномірності подачі палива між циліндрами.

#### *5. Електронні системи управління*

Електронне управління стало важливою складовою сучасних паливних систем. Воно дозволяє:

Точно регулювати параметри впорскування (тиск, тривалість, момент початку).

Оптимізувати роботу двигуна для різних режимів, забезпечуючи відповідність вимогам стандартів IMO та MARPOL [5].

Реалізувати функції самодіагностики та автоматичного регулювання, що спрощує експлуатацію.

#### *6. Виклики та тенденції*

Основними завданнями сучасних паливних систем є:

Зниження шкідливих викидів (NO<sub>x</sub>, CO, часток сажі) відповідно до екологічних стандартів.

Підвищення ефективності згоряння через покращення характеристик впорскування.

Висока надійність і довговічність, особливо в умовах тривалого використання на судах.

Стійкість до забруднень палива та забезпечення працездатності у широкому діапазоні температур і навантажень.

Таким чином, аналіз схем і конструкцій сучасних паливних систем суднових ДВЗ показує, що розвиток і впровадження інноваційних технологій у цій галузі є ключовим фактором для забезпечення ефективності, надійності та екологічності роботи суднових дизельних двигунів.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 29    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА

### Тепловий розрахунок двигуна DEUTZ 645 L6

Розрахунковий цикл поршневого двигуна внутрішнього згорання суттєво відрізняється від ідеального циклу. У розрахунковому циклі змінюються кількість робочого тіла, його склад і фізичні властивості. Через кінцеву швидкість згорання палива і процес дисоціації продуктів згорання, хімічна енергія, яка міститься в паливі, не вивільняється миттєво. Під час розширення відбувається догорання палива та відновлення дисоційованих газів із виділенням тепла. У розрахунковому циклі не можна припускати постійність теплоємностей робочого тіла, оскільки температура та склад газів у циліндрі значно змінюються. Окрім цього, у розрахунковому циклі враховуються теплові та аеродинамічні втрати [6].

*Вибір й обґрунтування вихідних даних для теплового розрахунку*

*Температура навколишнього повітря  $T_0$ . Приймаємо  $T_0 = 293$  К (стандартні умови застосування).*

*Тиск навколишнього повітря  $p_0$ . Варто приймати  $p_0 = 0,1013$  МПа (стандартні умови застосування).*

*Ступінь стиску  $\varepsilon$ . При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра і спосіб сумішоутворення. Приймаємо  $\varepsilon = 15$  [7].*

*Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ . Цей коефіцієнт також залежить від розмірів циліндра і способу сумішоутворення. Цей параметр при підвищенні зменшує питому витрату пального, водночас зменшуючи середній ефективний тиск та потужність. Відповідно його слід підбирати з кількох спроб розрахунку з урахуванням одночасного досягнення заданої потужності і найкращої можливої економічності. Вибір остаточного значення  $\alpha$  робиться з вибором оптимального значення  $\Pi_k$ . З урахуванням переліченого встановлюємо  $\alpha = 2,045$ .*

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 30    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Коефіцієнт залишкових газів  $\gamma_k$ . Вплив на значення цього коефіцієнту завдають тип двигуна, особливості повітропостачання і газообміну. Приймаємо  $\gamma_k = 0,025$ .

Коефіцієнт використання теплоти в точці  $z$  ( $\xi_z$ ), та в точці  $b$  ( $\xi_b$ ). Ця величина змінюється в широких межах і залежить від ступеня досконалості двигуна. Найкраще ці величини призначати після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проєктованого.

Приймаємо  $\xi_z = 0,95$ ;  $\xi_b = 0,98$ .

Ступінь підвищення тиску при згорянні  $\lambda$ . Приймаємо  $\lambda = 1,15$ .

Підігрів заряду від стінок циліндру  $\Delta T_c$ . Ця величина складає: (5 – 45) К – для ДВЗ з наддувом та (10 – 20) К – для ДВЗ без наддуву.

Приймаємо  $\Delta T_c = 15$  К.

Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми  $\zeta$ . Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають увагу на тип двигуна та особливості системи газообміну.

Приймаємо  $\zeta = 0,99$ .

Механічний ККД двигуна  $\eta_k$ .

Приймаємо  $\eta_k = 0,92$ .

Зменшення тиску у повітроохолоджувачі  $\Delta P_{ox}$ . Повітроохолоджувач являє собою опір на шляху повітря, тому у ньому відбувається зменшення тиску повітря. У числовому виразі  $\Delta P_{ox} = 0,004$  МПа.

Температура залишкових газів  $T_g$ .

Приймаємо  $T_g = 800$  К [6].

Хімічний склад палива. Розрахунок проводиться на важке паливо середнього складу [8]: С = 0,87 кг – кількість вуглецю; Н = 0,126 кг – кількість водню; S = 0 кг – кількість сірки; О = 0,004 кг – кількість кисню.

Коефіцієнт тактності  $Z$  – являє собою кількість робочих ходів поршня, що припадають на один оберт колінчастого вала, тоді для 4-тактних двигунів  $Z = 0,5$ .

Нижча теплота згорання палива  $Q_k$ . Приймаємо  $Q_k = 42700$  (кДж/кг).

## Результати розрахунку циклу двигуна

### Розрахунок процесу наповнення

$$T_k = T_0 \times \left[ 1 + \frac{\left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{0,286} - 1}{\eta_{k.ad}} \right] = 293 \times \left[ 1 + \frac{\left( \frac{0,41}{0,101} \right)^{0,286} - 1}{0,81} \right] = 470,825$$

$$T_s = T_k - \eta_o \times (T_k - T_0) = 470,825 - 0,85 \times (470,825 - 293) = 319,674$$

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \times T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{319,674 + 15 + 0,025 \times 800}{1 + 0,025} = 346,023$$

$$P_s = P_k - \Delta P_{ox} = 0,41 - 0,004 = 0,406$$

$$P_a = 0,97 \times P_s = 0,97 \times 0,406 = 0,394$$

$$\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \times \frac{P_a}{P_s} \times \frac{T_s}{T_a} \times \frac{1}{1 + \gamma_r} \times (1 - \varphi_n) = \frac{15}{15 - 1} \times \frac{0,394}{0,406} \times \frac{319,674}{346,023} \times \frac{1}{1 + 0,025} \times (1 - 0) = 0,937$$

### Розрахунок процесу стиску

$$n_I = 1,362$$

$$P_c = P_a \times \varepsilon^{n_I} = 0,394 \times 15^{1,362} = 15,702$$

$$T_c = T_a \times \varepsilon^{n_I - 1} = 346,023 \times 15^{1,362 - 1} = 922,136$$

### Розрахунок процесу згоряння

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \times \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{2,045}{0,21} \times \left( \frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,004}{32} \right) = 1,012$$

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \times H + O}{32 \times L} = 1 + \frac{8 \times 0,126 + 0,004}{32 \times 1,012} = 1,0313$$

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 32    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,0313 + 0,025}{1 + 0,025} = 1,0305$$

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,95}{0,98} = 0,969$$

$$\beta_z = 1 + \left( \frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left( \frac{1,0313 - 1}{1 + 0,025} \right) \times 0,969 = 1,03$$

$$\frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [c_v' + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times (c_v'' + 8,314 \times \lambda)] \times T_c = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times c_{pz}'' \times T_z$$

$$T_z = \frac{C}{A \times T_z + B}$$

$$A = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times b_z$$

$$B = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times (a_{vz} + 8,314)$$

$$C = \frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [(19,26 + 0,0025 \times T_c) + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times ((20,47 + 0,0036 \times T_c) + 8,314 \times \lambda)] \times T_c$$

$$T_z = 1935,545$$

$$P_z = \lambda \times P_c = 1,15 \times 15,702 = 18,057$$

#### Розрахунок процесу розширення

$$\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \times \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,03}{1,15} \times \frac{1935,545}{922,136} = 1,879$$

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{15}{1,879} = 7,982$$

$$n_2 = 1,273$$

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 33    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

$$T_b = T_z \times \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = 1935,545 \times \frac{1}{7,982^{1,273-1}} = 1098,01$$

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{18,057}{7,982^{1,273}} = 1,283$$

### Визначення індикаторних показників

$$P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \times \left[ \lambda \times (\rho - 1) + \frac{\lambda \times \rho}{n_2 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] =$$

$$= \frac{15,702}{15 - 1} \times \left[ 1,15 \times (1,879 - 1) + \frac{1,15 \times 1,879}{1,273 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{7,982^{1,273-1}} \right) - \frac{1}{1,362 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{15^{1,362-1}} \right) \right] = 3,041$$

$$P_i = P'_i \times \zeta \times (1 - \varphi_n) = 3,041 \times 0,99 \times (1 - 0) = 3,011$$

$$g_i = 433 \times \frac{P_s \times \eta_n}{\alpha \times L_0 \times T_s \times P_i} = 433 \times \frac{0,406 \times 0,937}{2,045 \times 0,495 \times 319,674 \times 3,011} = 0,169$$

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i \times Q_n} = \frac{3600}{0,169 \times 42700} = 0,499$$

### Визначення ефективних показників

$$P_e = P_i \times \eta_m = 3,011 \times 0,92 = 2,77$$

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = 0,499 \times 0,92 = 0,459$$

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,169}{0,92} = 0,184$$

$$N_e = 13,1 \times D_c^2 \times S_c \times z \times P_e \times n \times i = 13,1 \times 0,33^2 \times 0,45 \times 0,5 \times 2,77 \times 600 \times 6 = 3200,638$$

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \times 100\% = \frac{3200,638 - 3200}{3200} = 0,02\%$$

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 34    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Точність розрахунку задовільна, різниця між заданою і отриманою в результаті розрахунку потужності не перевищує 2%.

Визначення дійсного  $P_k$  компресора на даному режимі роботи двигуна

Універсальна газова стала  $R = 287 \text{ Дж/кг*К}$

$$G = \left( \frac{\pi \times D_c^2}{4} \right) \times S_c \times \left( \frac{P_s \times 10^6}{R \times T_s} \right) \times \eta_i \times i \times z \times \left( \frac{n}{60} \right) \times \phi_a =$$

$$= \left( \frac{3,14 \times 0,33^2}{4} \right) \times 0,45 \times \left( \frac{0,406 \times 10^6}{287 \times 319,674} \right) \times 0,499 \times 6 \times 0,5 \times \left( \frac{600}{60} \right) \times 1 = 4,786$$

$$G_t = G + g_e \times \frac{N_e}{3600} = 4,786 + 0,184 \times \frac{3200,638}{3600} = 4,95$$

$$P_r = \psi_t \times P_k = 0,724 \times 0,41 = 0,297$$

$$T_t = T_b \times \left( \frac{P_r}{P_b} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} = 1098,01 \times \left( \frac{0,297}{1,283} \right)^{\frac{1,273-1}{1,273}} = 802,204$$

$$M_s = \left( \frac{C}{12} \right) + \left( \frac{H}{2} \right) + [0,21 \times (\alpha - 1) \times L_0] + (0,79 \times \alpha \times L_0) =$$

$$= \left( \frac{0,87}{12} \right) + \left( \frac{0,126}{2} \right) + [0,21 \times (2,045 - 1) \times 0,495] + (0,79 \times 2,045 \times 0,495) = 1,044$$

$$R_t = \frac{1}{\frac{C}{12 \times M_s \times 189} + \frac{H}{2 \times M_s \times 461,6} + \frac{0,21 \times (\alpha - 1) \times L_0}{M_s \times 259,8} + \frac{0,79 \times \alpha \times L_0}{M_s \times 296,8}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{0,87}{12 \times 1,044 \times 189} + \frac{0,126}{2 \times 1,044 \times 461,6} + \frac{0,21 \times (2,045 - 1) \times 0,495}{1,044 \times 259,8} + \frac{0,79 \times 2,045 \times 0,495}{1,044 \times 296,8}} = 287,349$$

$$k_t = \frac{(a_{vb} + b_b \times T_t) + 8,314}{a_{vb} + b_b \times T_t} = \frac{(19,80878 + 0,002999 \times 802,204) + 8,314}{19,80878 + 0,002999 \times 802,204} = 1,372$$

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 35    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |



$$\Pi_k = \left[ 1 + \frac{\left( \frac{k_t}{k_t - 1} \right) \times R_t \times T_t \times \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_r}{P_0} \right)^{\frac{k_t - 1}{k_t}}} \times \eta_{t.m} \times \eta_{t.ad} \times G_t \right]}{G \times R \times T_0 \times \left( \frac{k_\epsilon}{k_\epsilon - 1} \right) \times \frac{1}{\eta_{k.ad}}} \right]^{\frac{1}{0,286}} =$$

$$= \left[ 1 + \frac{\left( \frac{1,377}{1,377 - 1} \right) \times 287,349 \times 802,204 \times \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,297}{0,101} \right)^{\frac{1,372 - 1}{1,372}}} \times 0,98 \times 0,82 \times 4,95 \right]}{4,786 \times 287,349 \times 293 \times \left( \frac{1,4}{1,4 - 1} \right) \times \frac{1}{0,81}} \right]^{\frac{1}{0,286}} = 4,047$$

$$P_{kd} = \Pi_k \times P_0 = 4,047 \times 0,101 = 0,41001$$

$$\Delta P_k = \frac{P_{kd} - P_k}{P_{kd}} \times 100\% = \frac{0,41001 - 0,41}{0,41001} = 0,001\%$$

Точність розрахунку задовільна, різниця між заданим і отриманим в результаті розрахунку тиском надуву не перевищує 2%.

### Модернізація системи управління подачею палива

Штатна система подачі палива не забезпечує можливості ефективної реалізації оптимального циклу впорскування, який включає щонайменше три етапи:

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 36    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Попереднє впорскування (ПВ): коротке за тривалістю впорскування для створення умов екологічного та безшумного спалювання основної порції палива.

Основне впорскування (ОВ): тривале впорскування, яке значно перевищує попереднє за обсягом і тривалістю.

Додаткове впорскування: короткий впорск для допалювання сажі, яка утворюється після основного впорскування.

Відомий метод управління подачею палива з використанням електрогідравлічної форсунки з двопозиційним клапаном дозволяє реалізувати такий оптимальний цикл. Цей метод передбачає переміщення двопозиційного клапана між верхнім і нижнім крайніми положеннями:

У верхньому положенні закривається наповнення клапана та відкривається розвантажувальний клапан, що забезпечує підйом голки й подачу палива.

У нижньому положенні відкривається наповнення клапана та закривається розвантажувальний клапан, що забезпечує зворотний рух голки та припинення впорскування.

Цей спосіб здійснюється за допомогою електричних або п'єзоелектричних приводів. Однак для його реалізації потрібні додаткові джерела енергії, складні схеми її перетворення та значні витрати енергії. П'єзоприводи, хоча й забезпечують необхідну точність, є складними у виробництві та дорогими. Через невеликі переміщення золотників виникає потреба в мультиплікаторах руху для п'єзоприводів. Простих механічних приводів, здатних забезпечити такі малі переміщення, наразі не існує.

Крім того, ця система має обмеження у точному дозуванні палива під час попередніх і додаткових впорскувань, оскільки всі етапи подачі палива реалізуються через отвори однакового рівня та діаметра. Це ускладнює забезпечення оптимального процесу сумішоутворення для різних фаз впорскування.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 37    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Для реалізації оптимального циклу подачі палива пропонується використовувати форсунки з двома рівнями отворів. У такій системі основна порція палива впорскується через другий рівень отворів більшого діаметра, що дозволяє досягти кращої ефективності спалювання.

У цьому дипломному проєкті запропоновано вдосконалену систему управління подачею палива, яка включає:

Форсунку з двопозиційним клапаном, обладнану підпружиненим штоком із кільцевим майданчиком, кінематично сполученим із високошвидкісним реверсивним приводом.

Камеру управління, яка через розвантажувальний клапан з'єднана із зовнішнім резервуаром, а через клапан наповнення і дросель — з лінією високого тиску та паливним насосом високого тиску.

Замикаючий елемент розпилювача, взаємодіючий із камерою управління зверху і лінією високого тиску знизу.

Розпилювач із одним рівнем отворів.

Паливний насос високого тиску, паливну ємність і паливопідкачуючий насос, з'єднані між собою гідравлічно.

Форсунка в цій системі матиме два рівні отворів для впорскування, оснащених голкою і втулкою, які співвісно розташовані. Вона забезпечена двома двопозиційними клапанами для керування голкою і втулкою. Золотники цих клапанів і їх сідла мають конічні замикаючі поверхні та кінематично з'єднані з високошвидкісними реверсивними механічними приводами.

Кожен привід складається з:

Пластини з опуклою поверхнею постійного радіуса і скошеним краєм, яка забезпечує взаємодію з профільованими кулачками.

Кулачків із мікропрофілями, які відповідають за реалізацію фаз впорскування (попереднього, основного і після основного).

Вала, кінематично з'єданого з колінчастим валом двигуна.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 38    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

У системі передбачено механізм для точного регулювання тривалості впорскування. Пластини забезпечують перемикання клапанів і регулюють тривалість впорскування шляхом взаємодії з мікропрофілями кулачків.

Камери під голкою і втулкою з'єднані з гідроаккумулятором високого тиску, а через наповнювальні клапани — з камерами управління над голкою і втулкою. Під час впорскування двопозиційні клапани з'єднують ці камери з гідроаккумулятором низького тиску. Пластини виконані з можливістю переміщення у площині, перпендикулярній або розташованій під кутом до осі голки, і кінематично з'єднані з підпружиненим штоком через шліцеве з'єднання.

Запропонована система дозволяє більш точно регулювати подачу палива, оптимізувати фази впорскування та зменшити втрати енергії, забезпечуючи високу ефективність і екологічність роботи двигуна.

Реалізація запропонованого пристрою забезпечує підвищення індикаторного ККД, покращення екологічних показників, підвищення надійності та зниження вартості паливної апаратури. Це досягається завдяки використанню простих механічних вузлів із одним валом, обладнаним програмованими кулачками та профілями, у поєднанні з пластинами для переміщення золотників двопозиційних клапанів і регулювання тривалості впорскувань. Така конструкція значно дешевша за електромеханічні приводи клапанів чи п'єзоприводи, що дозволяє знизити вартість форсунок і підвищити їхню надійність.

Підвищення надійності досягається завдяки заміні джерел електричної енергії, перетворювачів і електронних пристроїв для управління форсункою на механічні програмовані вузли, які є більш надійними. Крім того, у керуючій камері та порожнині форсунки підтримується стабільний тиск, що виключає можливість переривання впорскування. Водночас швидкодія механічного приводу (ШРМП) перевищує швидкодію систем із п'єзоприводами.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 39    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Завдяки зменшенню витрат енергії на управління подачею палива з використанням ШРМП підвищується індикаторний ККД. Це відбувається через зниження витрат палива на управління під час переходу клапана між сідлами.

Удосконалена система управління подачею палива проілюстрована кресленнями, представленими на рис. 3.1–3.4.

На рис. 3.1 показана схема системи управління подачею палива (форсунка з двома рівнями отворів і двома двопозиційними клапанами з конічними замикаючими поверхнями сідел (ДПК)).

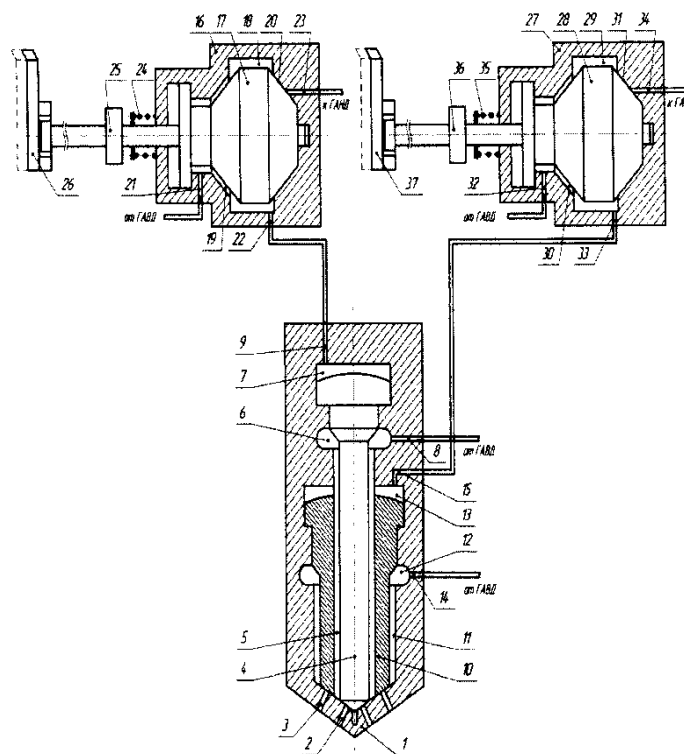


Рисунок 3.1 – Схема системи управління подачею палива

Система складається з таких компонентів:

Корпус форсунки (1): містить отвори першого рівня (2) і другого рівня (3).

Голка (4): має кільцеву проточку (5), камеру управління під голкою (6) і камеру управління над голкою (7).

Канали в корпусі форсунки:

Канал (8) подає паливо до голки знизу для впорскування через отвори першого рівня (2).

Канал (9) подає паливо до голки зверху для відсічення палива при подачі через перший рівень отворів.

Втулка (10): оснащена кільцевою проточною (11) і співвісно розташована з голкою (4).

Камери управління:

Камера (12) подає паливо знизу втулки для керування впорскуванням.

Камера (13) подає паливо зверху втулки для керування відсіченням.

Канали для втулки:

Канал (14) подає паливо до втулки для впорскування від гідравлічного акумулятора високого тиску (ГАВТ).

Канал (15) подає паливо для відсічення подачі через другий рівень отворів (3).

Перший двопозиційний клапан (ДПК) (16):

Золотник (17) із кільцевою проточною (18) між золотником і корпусом клапана.

Наповнювальний клапан (19, НК 19) і розвантажувальний клапан (20, РК 20).

Канал (21) для подачі палива до НК 19.

Канал (22) для подачі палива від ДПК 16 до голки при відсіченні.

Канал (23) для відведення палива через РК 20 до гідроакумулятора низького тиску (ГАНТ).

Пружина (24) діє на золотник (17).

Мультиплікатор переміщення (25, МП 25), пов'язаний з пластиною (26) першого швидкодіючого реверсивного механічного перемикача (ШРМП).

Другий двопозиційний клапан (ДПК) (27):

Золотник (28) із кільцевою проточною (29) між золотником і корпусом клапана.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 41    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Наповнювальний клапан (30, НК 30) і розвантажувальний клапан (31, РК 31).

Канал (32) для подачі палива до НК 30.

Канал (33) для подачі палива від ДПК 27 до втулки при відсіченні.

Канал (34) для відведення палива через РК 31 до гідроаккумулятора низького тиску.

Пружина (35) діє на золотник (28).

Мультиплікатор переміщення (36, МП 36), пов'язаний з пластиною (37) другого ШРМП.

На рис. 4.2 показана кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для першого двопозиційного клапана, який відповідає за управління голкою.

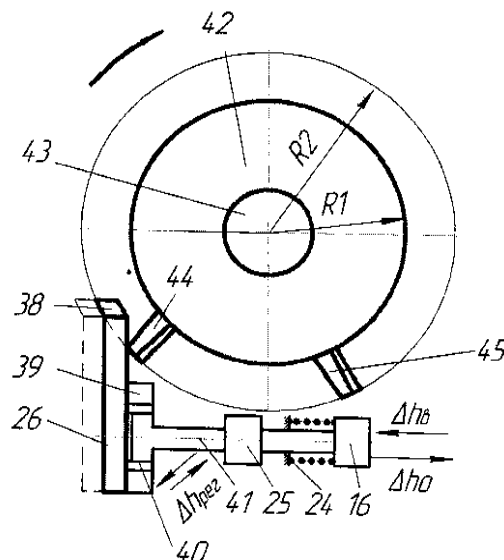


Рисунок 4.2 – Кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для першого двопозиційного клапана

Швидкодіючий реверсивний механічний привід (ШРМП) для першого двопозиційного клапана (ДПК) складається з наступних елементів:

Перший ДПК (16).

Пластина (26): має опуклу кінцеву частину (38), яка забезпечує взаємодію з мікропрофілями кулачка.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 42    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

На рис. 4.3 представлена кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для другого двопозиційного клапана, який використовується для управління втулкою.

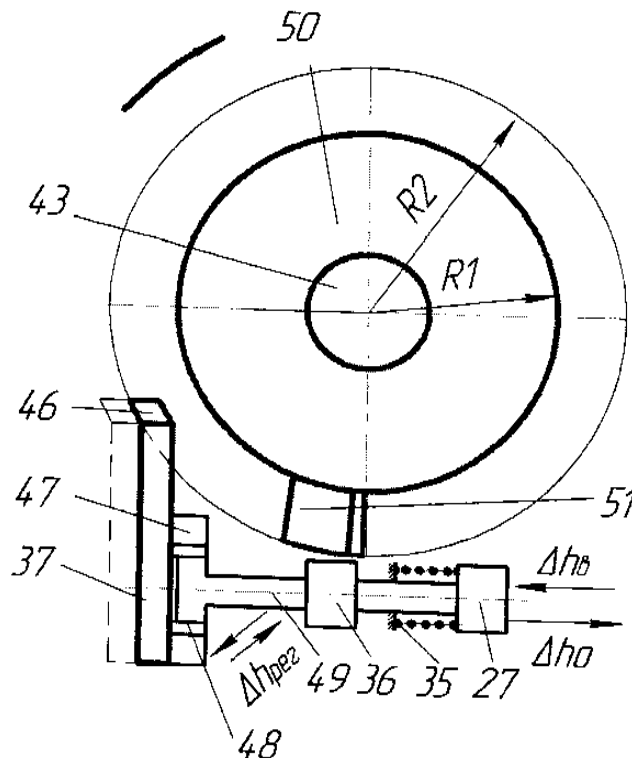


Рисунок 4.3 – Кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для другого двопозиційного клапана



Швидкодіючий реверсивний механічний привід (ШРМП) для другого двопозиційного клапана (ДПК) включає наступні елементи:

Пластина (37): має опуклу кінцеву частину (46), яка забезпечує взаємодію з мікропрофілями.

Пластина (47): жорстко з'єднана з пластиною (37) і оснащена шліцами (48), що з'єднують її зі штоком (49) на вході мультиплікатора переміщення (МП 36).

Шток (49): взаємодіє з входом мультиплікатора переміщення (36).

Мультиплікатор переміщення (36): вихідний шток підпружений пружиною (35) і продовжує другий золотник (28), забезпечуючи його рух.

Другий кулачок (50): встановлений на валу (43) і має мікропрофіль (51), призначений для управління подачею через другий рівень отворів (3) під час основного впорскування (СВ).

Мікропрофіль (51) має задану довжину, яка перевищує довжину мікропрофіль (44) для попереднього впорскування (ПВ) і (45) для впорскування після основного (ВПО), забезпечуючи більш тривале основне впорскування.

На рис. 4.4 представлена кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для першого двопозиційного клапана, що відповідає за управління голкою та тривалістю впорскування.

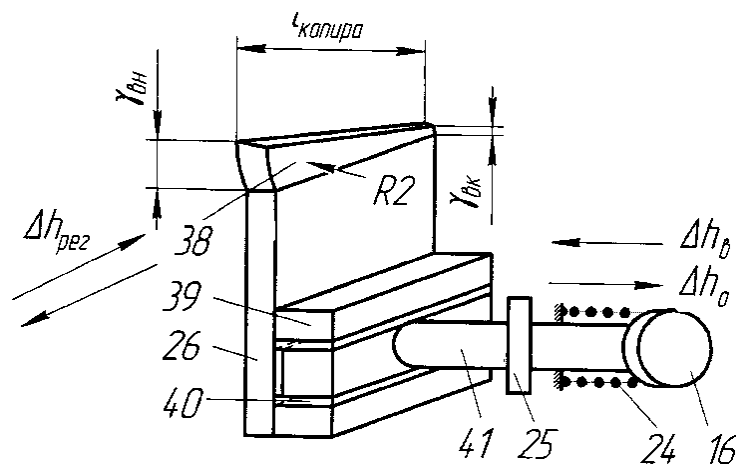


Рисунок 4.4 – Кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для першого ДПК для управління голкою і управлінням тривалістю впорскування

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           | 44    |

Швидкодіючий реверсивний механічний привід (ШРМП) для першого двопозиційного клапана (ДПК) складається з таких елементів:

Пластина (26): має опуклу кінцеву частину (38) зі скосом, яка забезпечує регулювання тривалості впорскування.

Пластина (39): оснащена шліцами (40) і з'єднана зі штоком (41), який взаємодіє з мультиплікатором переміщення (МП 25) на вході.

Мультиплікатор переміщення (МП 25): його вихідний шток підпружений пружиною (24) і продовжує перший золотник (17).

На рис. 4.5 представлена кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для другого двопозиційного клапана, який використовується для управління втулкою і тривалістю основного впорскування.

ШРМП для другого двопозиційного клапана складається з:

Пластина (37): має опуклу кінцеву частину (46) зі скосом для регулювання тривалості основного впорскування.

Пластина (47): оснащена шліцами (48), які з'єднані зі штоком (49) на вході мультиплікатора переміщення (МП 36).

Мультиплікатор переміщення (МП 36): його вихідний шток підпружений пружиною (35) і продовжує другий золотник (28).

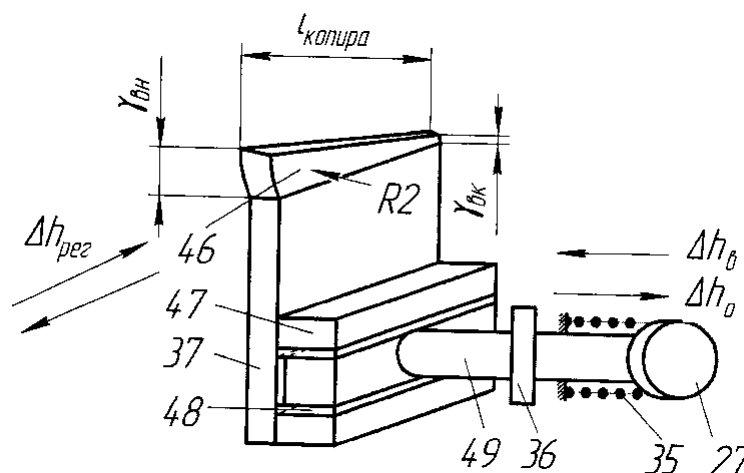


Рисунок 4.5 – Кінематична схема швидкодіючого механічного приводу для другого ДПК для управління втулкою і управлінням тривалістю основного впорскування

На рис. 4.6 представлена паливна система двигуна, що включає гідравлічний акумулятор високого тиску (ГАВТ) і гідравлічний акумулятор низького тиску (ГАНТ).

Склад паливної системи:

Паливний бак (не позначений окремою позицією).

Паливний насос із фільтром (53).

Паливний насос високого тиску (ПНВТ 54).

Гідравлічний акумулятор високого тиску (ГАВТ 55): оснащений датчиком тиску (ДТ 56) на вході і клапаном регулювання високого тиску (КРВТ 57). Всі елементи з'єднані між собою гідравлічними трубопроводами.

Гідравлічний акумулятор низького тиску (ГАНТ 58): обладнаний клапаном регулювання тиску (КРТ 59) на виході.

Трубопроводи:

Трубопровід (60): з'єднує ГАВТ 55 з ГАНТ 58.

Трубопровід (72): проходить через зворотний клапан (73) і з'єднує ГАНТ 58 з ПНВТ 54.

Трубопроводи (61, 62): підводять паливо до каналів 21 і 32 першого (ДПК 16) і другого (ДПК 27) двопозиційних клапанів.

Трубопроводи (63, 64, 65): з'єднують ГАВТ 55 із каналами 8 і 14 в корпусі форсунки для подачі палива до голки (4) і втулки (10) знизу під час впорскування.

Трубопровід (66): із зворотним клапаном (67) з'єднує канал 23 першого ДПК 16 з ГАНТ 58.

Трубопровід (68): із зворотним клапаном (69) з'єднує канал 34 другого ДПК 27 з ГАНТ 58.

Трубопровід (70): з'єднує канал 22 першого ДПК 16 із каналом 9 форсунки 1 для подачі палива до голки (4) зверху під час відсічення.

Трубопровід (71): з'єднує канал 33 другого ДПК з каналом 15 форсунки 1 для подачі палива до втулки (10) зверху під час відсічення.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 46    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Функціональність системи:

Система забезпечує виконання щонайменше трьох етапів впорскування:

Попереднє впорскування (ПВ): реалізується через управління голкою (4) за допомогою мікропрофілю (44) (рис. 4.2).

Впорскування після основного (ВПО): також здійснюється через управління голкою (4) за допомогою мікропрофілю (45).

Основне впорскування (ОВ): виконується через управління втулкою (10) за допомогою мікропрофілю (51) (рис. 4.1, 4.3, 4.5, 4.6).

Ця схема дозволяє точно регулювати фази впорскування, забезпечуючи високу ефективність і екологічність роботи двигуна.

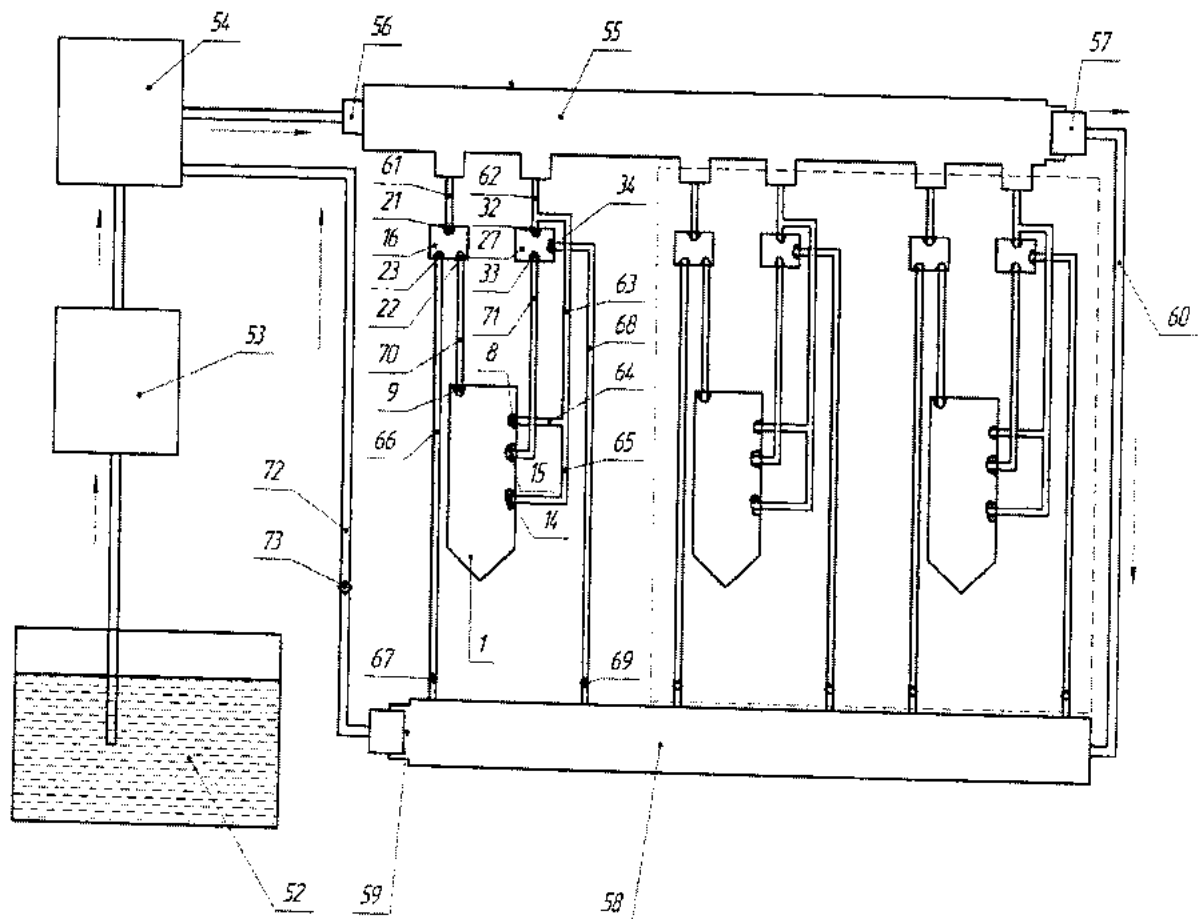


Рисунок 4.6 – Паливна система двигуна

## Робота трьохетапної системи впорскування палива

Система реалізує три послідовних впорскування: попереднє (ПВ), основне (ОВ) та впорскування після основного (ВПО), які утворюють єдиний оптимальний цикл подачі палива. При цьому механізми управління голкою (4) та втулкою (10) працюють незалежно, що дозволяє розглядати їх функціонування окремо.

### Управління голкою (4):

#### Попереднє впорскування (ПВ):

Переміщення пластини (26) у верхнє крайнє положення здійснюється через взаємодію її опуклої частини (38) з мікропрофілями (44) та (45) на кулачку (42), розташованому на валу (43).

Пластина рухається разом із штоком (41) до мультиплікатора переміщення (МП 25), далі шток разом із золотником (17) першого двопозиційного клапана (ДПК 16) виконує кінематичне переміщення.

Під час впорскування розтягується пружина (24), яка накопичує потенційну енергію. Голка (4) піднімається у верхнє положення, відкриваючи отвори для впорскування палива.

#### Рекуперація енергії:

Паливо з камери управління (7) над голкою відводиться до гідравлічного акумулятора низького тиску (ГАНТ 58), забезпечуючи відновлення енергії.

#### Закінчення впорскування:

Після завершення взаємодії мікропрофіля (44 або 45) із пластиною (26) голка опускається, закриваючи отвори. Регулювання тривалості впорскування виконується шляхом зміни довжини опуклої частини (38) пластини (26).

### Управління втулкою (10):

#### Основне впорскування (ОВ):

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 48    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Переміщення пластини (37) у верхнє положення забезпечується взаємодією її опуклої частини (46) з мікропрофілем (51) на кулачку (50), розташованому на тому ж валу (43).

Разом із пластиною (37) рухається шток (49) до мультиплікатора переміщення (МП 36), який забезпечує переміщення золотника (28) другого ДПК (27).

#### Рекуперація енергії:

Паливо з камери управління над втулкою (10) відводиться через зворотний клапан до ГАНТ (58), що дозволяє зменшити енергетичні витрати на управління.

#### Подача палива:

Паливо надходить до камери управління (12) втулки (10) знизу, відкриваючи отвори другого рівня (3) більшого діаметра, призначені для основного впорскування.

#### Закінчення впорскування:

Після завершення взаємодії мікропрофіля (51) із пластиною (37) втулка опускається, перекриваючи отвори. Регулювання тривалості впорскування здійснюється зміною довжини опуклої частини (46) пластини (37).

#### Особливості системи:

Регулювання часу впорскування можливе як вручну, так і автоматично за допомогою приводу.

Час впорскування автоматично змінюється залежно від частоти обертання вала (43), що дозволяє адаптувати систему до різних режимів роботи двигуна.

Система працює без електричних джерел енергії, що підвищує її надійність і спрощує конструкцію.

#### Ефективність і переваги:

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 49    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Використання трьохетапного впорскування дозволяє оптимізувати процес спалювання палива, зменшити витрати енергії на управління та підвищити ККД двигуна.

Простота механічної конструкції забезпечує надійність і знижує витрати на обслуговування.

За рахунок застосування мультиплікаторів збільшується точність і ефективність роботи системи.

Результати модернізації:

**Згідно з розрахунками, впровадження запропонованої системи управління подачею палива дозволяє знизити питому ефективну витрату палива для двигуна 6ЧН33/45 на 3% — з 184 г/(кВт·год) до 179 г/(кВт·год).**

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 50    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі модернізації піддалася паливна система двигуна. У результаті не змінюється швидкість ходу, поточний ремонт, а витрати на паливо, сума амортизаційних відрахувань і загальний об'єм (розмір) експлуатаційних витрат та ін. – зменшуються.

При цьому головними вихідними даними є:

- двигун DEUTZ 645 L6 загальною вартістю \$ 4,1 млн.;
- зменшення питомих витрат дизельного палива з 184 до 179 г/(кВт×год), при роботі двигуна з модернізованою системою управління подачі палива [розділ 3].

Оптова ціна судна після його модернізації за рахунок удосконалення елементів СЕУ визначається по формулі:

$$C_n = C_0 - \sum_{i=1}^m C_{0i} + \sum_{j=1}^n C_{nj},$$

де  $C_0$ ,  $C_n$  – оптова ціна двигуна до і після модернізації (тобто базового і нового варіантів) \$;

$C_{0i}$  – сумарна ціна агрегатів що підлягають заміні ( $C_{0i} = 24000$  \$);

$C_{nj}$  – сумарна ціна нових агрегатів та вузлів ( $C_{nj} = 72000$  \$);

$m$  – кількість агрегатів СЕУ, що модернізуються (у нашому випадку  $m = 1$ );

$n$  – кількість нових агрегатів СЕУ (у нашому випадку  $n = 1$ ).

Оптова ціна базових двигунів приймається за даними заводу-будівника. У нашому випадку  $C_0 = 4100000$  \$;

$$C_n = 4100000 - 24000 + 72000 = 4148000 \text{ \$}$$

Замість визначення ціни базового і проектного варіантів двигуна по наведеній формулі, знайдемо їх різницю, оскільки лише два члени у цієї формули будуть розрізнятися і саме ця різниця складе додаткові інвестиції:

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 51    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |



$$K_{\partial n} = \sum_{j=1}^n C_{nj} - \sum_{i=1}^m C_{\partial i}.$$

$$K_{\partial n} = 72000 \times 1 - 24000 \times 1 = 48000 \$$$

Для розрахунку вкладень на модернізацію використовуємо узагальнені показники, якими являються робоча година на виконання та вартість 1-го нормочасу даних робіт, у залежності від їх складності, яка для України в середньому складає близько 420 грн., або 10 \$ (для закордонних виробників – від 70 до 100 \$). Додаткові інвестиції зводимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Додаткові інвестиції

| Вид робіт                     | Тривалість, людино-години | Вартість нормо-год., \$ | Вартість робіт ( $K_v$ ), \$ |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Монтаж системи                | 12                        | 90                      | 1080                         |
| Налаштування пристроїв        | 2                         | 85                      | 170                          |
| Випробування двигуна          | 12                        | 100                     | 1200                         |
| Регулювання елементів системи | 16                        | 120                     | 1920                         |
| Всього                        | 42                        | -                       | 4370                         |

Таким чином, додаткові інвестиції складуть величину:

$$K_{\partial} = K_{\partial n} + K_v$$

$$K_{\partial} = 48000 + 4370 = 52370 \$.$$

Витрати на амортизаційні відрахування  $B_{ам}$  при порівняльній ефективності визначаються по нормах амортизації ( $H_A$ ) і беруться в розмірі 20 % від величини додаткових інвестицій  $K_{\partial}$ . Розраховуються по формулі:

$$B_{ам} = 20/100 \times K_{\partial}$$

$$B_{ам} = 20/100 \times 52370 = 10474 \$.$$

Витрати на паливо-мастильні матеріали, так звані змінні, розраховуються з урахуванням витрат палива та мастильних матеріалів на ходу для головного двигуна при 100 % навантаженні.

Витрати на паливо:

$$B_{нал} = N \times g_e \times T_e \times B_n,$$

де  $N$  – потужність двигуна (для базового та модернізованого двигуна при 100% навантаженні – 3200 кВт);

$g_e$  – питома витрата палива при роботі двигуна на дизельному паливі (для базового при 100% навантаженні – 0,184 кг/кВт×год; для модернізованого двигуна – 0,179 кг/кВт×год);

$T_e$  – години роботи двигуна при повному навантаженні на дизельному паливі в рік, (для базового та модернізованого двигуна – 4000);

$B_n$  – вартість 1 кг палива, \$, (1) [8].

$$B_{нал}(Б) = 3200 \times 0,184 \times 4000 \times 1 = 2355200,0 \$$$

$$B_{нал}(М) = 3200 \times 0,179 \times 4000 \times 1 = 2291200,0 \$$$

Додатковий економічний ефект від зменшення витрат палива виникає в результаті економії витрат на його завантаження, контроль, зберігання та роботу паливних насосів для транспортування.

Питомі витрати мастильних матеріали для двигуна DEUTZ 645 L6 складають 0,2 % витрат на паливо .

Витрати на мастильні матеріали, \$ рік:

$$B_{мм} = B_{нал} \times 0,2\%$$

$$B_{мм}(Б) = B_{нал}(Б) \times 0,2\% = 2355200,0 \times 0,2\% = 4710,4 \$$$

$$B_{мм}(М) = B_{нал}(М) \times 0,2\% = 2291200,0 \times 0,2\% = 4582,4 \$.$$

Результаті розрахунків занесемо до таблиці 4.2.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 53    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку експлуатаційних витрат, \$

| Стаття витрат                            | Базове рішення | Нове рішення | Відхилення |
|------------------------------------------|----------------|--------------|------------|
| Амортизаційні відрахування $B_{ам}$      | –              | 10474,0      | 10474,0    |
| Витрати на паливо $B_{пал}$              | 2355200,0      | 2291200,0    | 64000,0    |
| Витрати на мастильні матеріали $B_{нал}$ | 4710,4         | 4582,4       | 128,0      |
| Всього                                   | 2359910,4      | 2306256,4    | 53654,0    |

Загальний балансовий річний прибуток  $\Pi_6$  розраховують за формулою:

$$E_p = \Delta B - B_{ам}$$

$$\Delta B = (B_{нал(Б)} + B_{мм(Б)}) - (B_{нал(М)} + B_{мм(М)})$$

$$E_p = ((2355200,0 + 4710,4) - (2291200,0 + 4582,4)) - 10474,0 = 53654,0 \$$$

Чистий прибуток ( $\Pi_ч$ ) визначається як різниця між балансовим прибутком ( $\Pi_6$ ) та податком на прибуток:

$$\Pi_ч = \Pi_6 - (0,18 \times \Pi_6) = 0,82 \times \Pi_6$$

$$\Pi_ч = 0,82 \times 53654,0 = 43996,28 \$$$

Термін окупності додаткових інвестицій ( $T_{ОК}$ ) визначається за формулою:

$$T_{ОК} = K_д / \Pi_ч$$

$$T_{ОК} = 52370 / 43996,28 = 1,19 \text{ року}$$

Таким чином, запропоновані в проекті заходи дозволяють зекономити близько \$ 43996,28 на рік, в основному, за рахунок економії дизельного палива. Термін окупності запропонованих рішень становить 1,19 року або 434 доби.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 54    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## РОЗДІЛ 5

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ОХОРОНИ ПРАЦІ

#### **Нормативно-правова та законодавча база охорони праці на суднах**

Охорона праці на суднах є важливим елементом забезпечення безпеки мореплавства, збереження здоров'я та життя членів екіпажу. Нормативно-правова та законодавча база охорони праці регулює права, обов'язки та відповідальність працівників і роботодавців у сфері створення безпечних умов праці на суднах [9].

#### *Міжнародна нормативно-правова база*

##### **1. Конвенція про працю в морському судноплавстві (MLC, 2006):**

- Забезпечує захист прав моряків у частині умов праці, проживання, медичного обслуговування та соціального забезпечення.
- Встановлює стандарти безпеки праці, включаючи вимоги до санітарно-гігієнічних умов і організації робочого часу на судні.
- Регламентує правила відпочинку для запобігання втомі та зменшення ризиків виробничого травматизму.

##### **2. Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (SOLAS, 1974):**

- Охоплює питання безпеки судноплавства, включаючи вимоги до захисту працівників під час виконання робіт.
- Містить положення щодо навчання екіпажу заходам безпеки.

##### **3. Міжнародна конвенція з підготовки та дипломування моряків та несення вахти (STCW, 1978):**

- Визначає стандарти підготовки екіпажу до роботи в умовах підвищеної небезпеки.
- Передбачає навчання з охорони праці та реагування на надзвичайні ситуації.

|     |      |             |        |      |                                  |       |
|-----|------|-------------|--------|------|----------------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | <i>КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                                  | 55    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                                  |       |

4. Конвенція МОП № 155 "Про безпеку та гігієну праці":

- Регламентує загальні принципи створення безпечних умов праці, які стосуються і суднового екіпажу.

*Національна законодавча база*

1. Кодекс законів про працю України (КЗпП):

- Статті КЗпП регулюють трудові відносини та визначають права і обов'язки працівників і роботодавців у сфері охорони праці.
- Встановлюють вимоги щодо безпечних умов праці на судах, обов'язкове страхування та медичне забезпечення працівників.

2. Закон України "Про охорону праці":

- Визначає правові основи організації безпеки праці, а також обов'язки судновласників у забезпеченні охорони праці на судах.
- Передбачає обов'язкове проведення атестації робочих місць та регулярний контроль за умовами праці.

3. Кодекс торговельного мореплавства України:

- Встановлює вимоги до організації праці екіпажу судна та забезпечення його безпеки під час морських перевезень.
- Регулює умови роботи на судах, а також дотримання правил безпеки під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт.

4. Накази та положення Міністерства інфраструктури України:

- Регламентують детальні процедури забезпечення охорони праці на судах.
- Включають нормативи щодо забезпечення суден аварійно-рятувальним обладнанням, медичними засобами та засобами індивідуального захисту.

5. Державні стандарти та правила охорони праці:

- ДСТУ, які встановлюють технічні вимоги до обладнання на судах і регламентують безпечну організацію праці.

- Правила з охорони праці під час виконання окремих видів робіт, наприклад, у машинному відділенні, на палубі, у вантажних трюмах.

#### *Основні аспекти охорони праці на суднах*

Безпечні умови роботи:

Забезпечення екіпажу засобами індивідуального захисту (каска, рятувальні жилети, рукавички тощо).

Контроль за технічним станом обладнання, механізмів і суднових конструкцій.

Організація робочого часу та відпочинку:

Дотримання норм часу роботи та перерв для запобігання втомі.

Навчання екіпажу:

Регулярне навчання заходам безпеки, наданню першої медичної допомоги та евакуації у разі аварійних ситуацій.

Контроль умов праці:

Проведення регулярних перевірок стану охорони праці на судні.

Оцінка ризиків, пов'язаних із виконанням робіт у небезпечних зонах.

*Нормативно-правова та законодавча база охорони праці на суднах спрямована на забезпечення безпеки та здоров'я моряків, а також на запобігання виробничим травмам та аваріям. Її виконання є обов'язковим для судовласників та екіпажу і базується на міжнародних конвенціях, національних законах і технічних регламентах. Систематичний контроль і навчання екіпажу дозволяють зменшити ризики та підвищити ефективність роботи на суднах.*

#### **Аналіз небезпечних та шкідливих факторів під час експлуатації, ремонту та технічного обслуговування паливної системи головного двигуна**

Паливна система головного двигуна судна є однією з найважливіших складових, яка забезпечує стабільну роботу суднової енергетичної установки. Однак, під час її експлуатації, ремонту та технічного обслуговування існує

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 57    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

низка небезпечних та шкідливих факторів, які можуть становити загрозу для персоналу, обладнання та екології [10].

## 1. Небезпечні фактори під час експлуатації

Високий тиск у системі:

Робочий тиск у паливній системі може досягати кількох сотень мегапаскалів, що створює ризик розриву трубопроводів або протікання палива.

У разі несправності форсунок чи клапанів можливий неконтрольований викид палива під високим тиском, що може травмувати персонал.

Високі температури:

Паливна система розташована у машинному відділенні, де температура повітря може перевищувати 50°C.

Контакт з нагрітими поверхнями обладнання або гарячим паливом може спричинити опіки.

Пожежо- та вибухонебезпека:

Розлив палива або утворення його парів у замкнутому просторі машинного відділення створює високий ризик займання.

Недостатня вентиляція може призвести до накопичення вибухонебезпечних газів.

Механічні травми:

Рухомі елементи паливних насосів або механізмів управління створюють ризик отримання травм через необережність персоналу.

## 2. Шкідливі фактори під час експлуатації

Токсичний вплив палива:

Контакт із дизельним паливом або його парами може викликати подразнення шкіри, слизових оболонок, а також отруєння при вдиханні.

Випари палива містять токсичні сполуки, включаючи бензол, які впливають на органи дихання та нервову систему.

Шум та вібрації:

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 58    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

Робота паливних насосів високого тиску та форсунок супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібраціями, що може негативно вплинути на слух та загальний стан персоналу.

Забруднення повітря:

Викиди сажі, чадного газу (CO), оксидів азоту (NOx) з відпрацьованими газами двигуна забруднюють повітря у машинному відділенні.

Це може викликати хронічні захворювання дихальних шляхів у персоналу.

3. Небезпечні та шкідливі фактори під час ремонту та технічного обслуговування

Робота з паливом:

Злив, заправка або очищення паливних резервуарів підвищують ризик контакту з паливом і вдихання його парів.

Можливий розлив палива через неправильне закриття клапанів або зношення трубопроводів.

Небезпека розриву трубопроводів:

При розбиранні паливних ліній під час ремонту залишковий тиск у системі може викликати раптовий викид палива.

Ризик електротравм:

Технічне обслуговування електронних систем управління паливоподачею (наприклад, форсунок із п'єзоелектричним приводом) може спричинити ураження струмом через неправильне зняття напруги.

Важкодоступність вузлів:

Деякі елементи паливної системи розташовані у важкодоступних місцях, що підвищує ризик травмування під час їх демонтажу або установки.

Порушення вентиляції:

Роботи у машинному відділенні без належної вентиляції призводять до накопичення токсичних парів палива, що негативно впливає на самопочуття персоналу.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 59    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |



#### 4. Рекомендації щодо мінімізації небезпечних та шкідливих факторів

Під час експлуатації:

Регулярно перевіряти герметичність трубопроводів, форсунок і клапанів.

Застосовувати засоби індивідуального захисту (каски, рукавички, захисні окуляри, вогнестійкий одяг).

Забезпечувати належну вентиляцію машинного відділення для запобігання накопиченню парів палива.

Під час ремонту та обслуговування:

Перед початком робіт розряджати тиск у паливній системі.

Використовувати вибухозахищене обладнання при роботі в замкнутих просторах.

Проводити навчання персоналу щодо роботи з паливною системою і забезпечувати доступ до інструкцій з безпеки.

Зниження впливу шуму та вібрацій:

Використовувати антишумові навушники та віброізолюючі рукавички.

Регулярно обслуговувати паливні насоси і механізми для зменшення вібрацій.

Контроль за токсичними речовинами:

Проводити моніторинг повітря у машинному відділенні на наявність шкідливих сполук.

Установлювати локальні витяжні вентиляційні системи для зменшення концентрації парів палива.

*Під час експлуатації, ремонту та технічного обслуговування паливної системи головного двигуна судна існує низка небезпечних та шкідливих факторів, які можуть негативно вплинути на персонал і навколишнє середовище. Ефективне дотримання нормативно-правових вимог, використання засобів індивідуального захисту та правильна організація*

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 60    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

*робіт є основними заходами для мінімізації ризиків і забезпечення безпечних умов праці.*

|            |             |                    |               |             |                                  |       |
|------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|----------------------------------|-------|
|            |             |                    |               |             | <i>КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ</i> | Аркуш |
|            |             |                    |               |             |                                  | 61    |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ документа</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                  |       |

## ВИСНОВКИ

Було досліджено конструктивні особливості чотиритактного середньообертового двигуна Deutz 645 L6 та проведено аналіз сучасних методів підвищення економічності й надійності роботи паливної апаратури. У результаті аналізу встановлено, що одним із перспективних способів підвищення паливної економічності двигуна є модернізація системи управління подачею палива.

Під час розробки двигуна було виконано розрахунки робочого циклу.

Запропоновано впровадження мультивпорскування, яке сприятиме оптимізації процесу спалювання палива в циліндрі, що, у свою чергу, дозволить підвищити індикаторний ККД дизельного двигуна.

В розділі охорони праці розглянуті основні напрямки забезпечення охорони праці на суднах та міжнародні норми та стандарти охорони праці на суднах.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 62    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Significant ships of 2007. The Royal Institution of Naval Architects, 2007. pp. 47 - 48.
2. DEUTZ 645 L6. Project guide, 2014. 235 p.
3. Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, 2004. 914 p.
4. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. Миколаїв : Вид-во Торубара В.В., 2015. 332 с.
5. Kees Kuiken. Diesel Engines for ship propulsion and power plants. Target Global Energy Training. Onnen, The Netherlands. July 2008.
6. Судновий механік: Довідник у 3 томах / за редакцією А. А. Фока. Одеса.: Фенікс, 2008. Т. 1. 1036 с.
7. Latarche M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Tenth edition. Elsevier Ltd, 2021. 930 p.
8. <https://shipandbunker.com/prices>.
9. Міжнародні конвенції, кодекси, рекомендації ІМО і МАРПОЛ. Одеса, 2008. 80 с.
10. ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.

|     |      |             |        |      |                           |       |
|-----|------|-------------|--------|------|---------------------------|-------|
|     |      |             |        |      | КРМ.142.6222м.24.12.00.ПЗ | Аркуш |
|     |      |             |        |      |                           | 63    |
| Зм. | Арк. | № документа | Підпис | Дата |                           |       |